

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS Y ESTUDIOS DE LINEAS DE
TRANSMISION EN C. A. DESBALANCEADAS

POR

ALBERTO MARTINEZ MARES

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. MARZO DE 2002

2002

TM
Z5853
.M2
FIME
2002
.M3

ANALISIS Y ESTUDIOS DE LINEAS DE

TRANSMISION EN C.A. DESBALTANCADAS

AMM



1020147517

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS Y ESTUDIOS DE LINEAS DE
TRANSMISION EN C. A. DESBALANCEADAS

POR

ALBERTO MARTINEZ MARES

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
DE LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. MARZO DE 2002

97/035

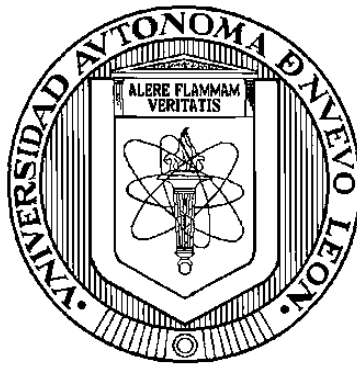
TM
Z 5853

.M2
FINE
2002
.M3.



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS Y ESTUDIOS DE LINEAS DE TRANSMISION EN C. A.
DESBALANCEADAS

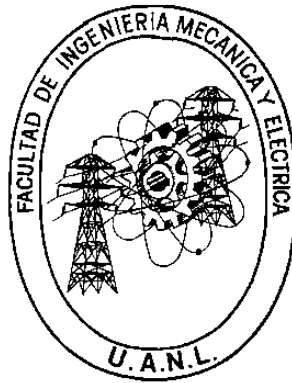
Por:

ALBERTO MARTINEZ MARES

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

San Nicolás de los Garza, N. L.

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



ANALISIS Y ESTUDIOS DE LINEAS DE TRANSMISION EN C. A.
DESBALANCEADAS

Por:

ALBERTO MARTINEZ MARES

TESIS
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA


Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Postgrado

Los miembros de comité de tesis recomendamos que la tesis **ANÁLISIS Y ESTUDIOS DE LINEAS DE TRANSMISION EN C. A. DESBALANCEADAS**, realizada por el alumno Alberto Martínez Mares, matricula 1079798 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

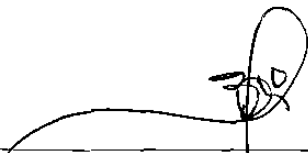
El Comité de Tesis




Asesor
Dr. Salvador Acha Daza



Coasesor
Dr. Rogelio Ramírez Barradas



Coasesor
Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel



Vo. Bo.
M. C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

DEDICATORIA

Quiero dedicar el esfuerzo dedicado para la realización de esta tesis a mis padres Marta y Alberto, quienes han sido un ejemplo absoluto en mi vida y me han apoyado y brindado con su confianza incondicionalmente. Además quiero agradecer y dedicar esta tesis a: Martha, Olimpia, América, Moisés, Desiree y Monserrat, quienes son para mí la razón de superación, esfuerzo y dedicación constantes.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por estar siempre pendiente de lo que ocurre con mi vida, y de quienes no escribo sus nombres porque no alcanzaría esta página, pero ellos saben a quienes me refiero.

Al Dr. Salvador Acha Daza por su asesoría y apoyo desde el inicio de mis estudios de postgrado, pero sobre todo por su gran calidad como persona.

Al Dr. Claudio Fuerte Esquivel y al Dr. Rogelio Ramírez Barradas, por sus valiosos comentarios que enriquecieron el contenido de esta tesis.

A todos los profesores del Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, de quienes me llevo algo muy valioso que son sus conocimientos.

A la familia Moreno González por su apoyo, confianza y amistad.

A todos mis compañeros de la maestría por la amistad que me otorgaron, a mis primos y a todos mis amigos que donde quieran que estén siempre ocupan un lugar muy importante en mi vida.

A las siguientes personas quienes de alguna manera me han ayudado: Ing. Lino Coria Cisneros, Ing. José Luis Lemus Duarte, Sra. Eloisa Izquierdo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado durante la realización de mis estudios de Postgrado.

A mi alma mater el Instituto Tecnológico de Morelia y a la Universidad Autónoma de Nuevo León, por permitirme ser parte de ellas.

RESUMEN

ANALISIS Y ESTUDIOS DE LINEAS DE TRANSMISION EN C. A. DESBALANCEADAS

Publicación, No. _____

Alberto Martínez Mares, M. C. en Ing. Eléctrica

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2001

Profesor Asesor: Salvador Acha Daza, Ph. D.

Las líneas de transmisión ocupan un lugar importante en el estudio de las redes eléctricas, son los elementos del sistema encargados de transportar la energía desde las lejanas centrales eléctricas de generación hasta los centros de consumo.

En este proyecto de investigación se efectúa la formulación de un modelo de la línea de transmisión para considerar desbalances y el impacto que tienen en estudios que convencionalmente se efectúan considerando que el sistema eléctrico es balanceado.

Los desbalances en las líneas de transmisión se originan por la falta de transposición de conductores, los efectos originados por los campos electromagnéticos están directamente relacionados con las distancias entre los conductores de la línea de transmisión, de manera que la rotación de los conductores provocaría que los efectos mutuos entre las fases se cancelen debido a que los conductores de la línea de transmisión vista desde sus terminales tendrían distancias equivalentes iguales entre ellos, matemáticamente en las matrices de

impedancia y de admitancia que modelan la línea de transmisión, aparecen diferencias entre los elementos mutuos fuera de la diagonal.

Los estudios realizados en estos sistemas que no consideran el desbalance tales como: control de perfil de voltaje, cargabilidad, etc., [2, 3, 19] consideran la transformación de componentes simétricas, como una manera de diagonalizar las matrices de impedancia y admitancia, donde se encuentra que con la solución de la red equivalente de secuencia positiva [3, 21] se resuelve totalmente el sistema asumido balanceado, las ventajas que este método ofrece es que la solución del sistema en redes de secuencia es muy sencilla en comparación con la solución del sistema en el dominio de las fases, además de que debido a que el sistema es considerado balanceado, la única red de secuencia que resulta energizada es la red de secuencia positiva, y así solamente se tiene que resolver una red para obtener la solución del sistema completo, sin embargo no considerar los desbalances del sistema puede llevar a determinar condiciones de operación erróneas en el sistema eléctrico.

En este trabajo se considera la posibilidad de realizar los estudios mencionados en el párrafo anterior considerando los desbalances del sistema eléctrico, esto se logra planteando una transformación diferente a la de componentes simétricas para cada caso específico de estudio, las ventajas que este método ofrece son que la solución de las tres redes de equivalentes resulta más sencillo que resolver el sistema en el dominio de las fases donde se tiene un sistema totalmente acoplado y que resulta más complejo y requiere de un mayor tiempo computacional para su solución, sin embargo las desventajas son que las transformaciones deben calcularse para cada caso en específico.

Sin embargo todas las desventajas que pudieran determinarse con este método el autor considera que son bien compensadas por el hecho de obtener consideraciones de operación más precisas que en el caso donde los desbalances del sistema son ignorados.

En este trabajo se tratan temas relacionados con la operación en estado estable de las líneas de transmisión, tales como son: estudios de compensación, cargabilidad y la respuesta a la frecuencia, se realiza además un análisis estadístico de energizaciones mediante la ayuda del software generalizado ATPdraw.

Se agregan al final las conclusiones obtenidas por el autor durante la realización del trabajo, además de algunas recomendaciones para trabajos futuros para ampliar el conocimiento sobre la explotación de los sistemas eléctricos existentes, considerando la naturaleza de los mismos con modelos que representen con mayor precisión.

INDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi

CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1	Motivación	1
1.2	Objetivo del trabajo de investigación	2
1.3	Descripción del contenido del trabajo	2

CAPITULO 2 DETERMINACIÓN DE MODELOS EQUIVALENTES PARA ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA

2.1	Determinación de Parámetros para líneas aéreas de transmisión	
2.1.1	Conductores Compuestos y el Radio Geométrico Equivalente	4
2.1.2	Resistencia Equivalente	6
2.1.3	Efecto Inductivo	7
2.1.3.1	Inductancia debida al flujo interno	8
2.1.3.2	Inductancia en una línea de dos Conductores	9
2.1.3.3	Coeficientes de Maxwell	11
2.1.4	Efecto Capacitivo	14
2.1.4.1	Cálculo de Capacitancia	14
2.1.4.2	Conductores Agrupados	16
2.1.5	Corrección de Carson	16

INDICE (continuación)

2.2	Matrices Equivalentes	21
2.2.1	Reducción de Kron	21
2.3	Equivalentes Modales	25
2.3.1	Modos de Propagación	25
2.3.1.1	Línea de Transmisión Completamente Transpuesta	25
2.3.1.2	Modelo π para Línea con Parámetros Distribuidos	26
2.3.1.3	Constantes ABCD de la Línea de Transmisión	33
2.3.1.4	Línea de Transmisión No Transpuesta	35
2.3.2	Equivalentes Modales π y Solución de Flujos	39
2.3.3	Desbalances en Líneas de Transmisión de doble circuito	45
2.4	Observaciones	48

CAPITULO 3 ANALISIS DE COMPENSACION DE LINEAS DE TRANSMISION BALANCEADAS Y DESBALANCEADAS

3.1	Conceptos de Compensación	49
3.1.1	Compensación en Paralelo	49
3.1.1.1	Compensación Capacitiva	52
3.1.1.2	Compensación Inductiva	53
3.1.2	Compensación Serie	54
3.2	Efectos en la Estabilidad del Sistema	57
3.3	Control del Perfil de Voltaje	61
3.4	Efecto de Compensación en Líneas Desbalanceadas	63
3.5	Observaciones	65

INDICE (continuación)

CAPITULO 4 ANALISIS GENERALIZADO DE CARGABILIDAD EN LINEAS DE TRANSMISION

4.1	Límites de Cargabilidad y Factores de Sensitividad	68
4.1.1	Limite Térmico	69
4.1.2	Limite por Caída de Tensión	70
4.1.3	Limite de Estabilidad	70
4.2	Modelo para Análisis de Cargabilidad	72
4.3	Factores de Sensitividad	73
4.4	Curvas de Potencia Normalizadas al SIL de la Línea de Transmisión	76
4.4.1	Análisis de la Línea sin pérdidas	76
4.5	Análisis Generalizado de Cargabilidad	80
4.5.1	Análisis de Líneas de Transmisión Balanceadas	80
4.5.2	Análisis de Líneas de Transmisión Desbalanceadas	84
4.6	Equivalentes de Sistemas Interconectados por Múltiples Enlaces	87
4.6.1	Equivalente Trifásico	87
4.7	Formulación para el Estudio de Flujos	91
4.7.1	Matriz de admitancia nodal en coordenadas de fase <i>abc</i>	92
4.8	Factores de Sensitividad	94
4.9	Análisis de Cargabilidad	96
4.10	Análisis de Resultados y Observaciones	98

CAPITULO 5 ASPECTOS ESTADISTICOS DE ENERGIZACION DE LINEAS DE TRANSMISIÓN

5.1	Introducción	101
5.2	Herramientas Computacionales	102
5.2.1	Interruptor Estadístico de ATPdraw	102
5.2.2	Software de Estadísticas JMP	104

INDICE (continuación)

5.3	Tiempo de Energización	105
5.4	Análisis Estadístico	106
5.4.1	Correlación	107
5.4.2	Densidad de Puntos Muestrales	108
5.5	Observaciones	110

CAPITULO 6 RESPUESTA A LA FRECUENCIA DE LINEAS DE TRANSMISION

6.1	Introducción	112
6.2	Fenómeno de Resonancias	113
6.2.1	Resonancia Serie	113
6.2.2	Resonancia Paralelo	114
6.3	Cálculo de Impedancia $Z(\omega)$ dependiente de la frecuencia	116
6.4	Fenómeno de Resonancias en Líneas de Transmisión	117
6.5	Efectos debidos a Elementos de Compensación	121
6.6	Observaciones	125

CAPITULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Introducción	126
7.2	Conclusiones y Aportaciones	126
7.3	Recomendaciones para trabajos futuros	129

BIBLIOGRAFIA	131
---------------------	-----

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	133
----------------------------------	-----

APENDICE A	137
-------------------	-----

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Motivación

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia es de gran importancia tener un pleno conocimiento de la red, para esto se debe contar con modelos de los elementos que ajusten las características físicas de cada elemento de la manera más apropiada posible.

Mediante un modelado y un análisis apropiado de los elementos, puede determinarse un punto óptimo de operación, cumpliendo siempre con los requerimientos de seguridad de los sistemas, explotando los sistemas existentes y además obtener una mejor estimación de los valores de las variables de interés. La explotación de sistemas es particularmente importante en sistemas eléctricos que operan en ambientes que no permiten las grandes inversiones requeridas para ampliaciones de las redes eléctricas, que son necesarias para suministrar el crecimiento de la demanda de energía eléctrica.

Las líneas de transmisión, representan un elemento de particular importancia en sistemas eléctricos caracterizados por tener una configuración altamente radial, de manera que todos los enlaces son de vital importancia para la operación de los sistemas eléctricos. En este elemento se debe tener un pleno conocimiento de los parámetros que definen sus límites de operación, para operar la línea dentro de sus límites de cargabilidad y sin violar ninguna restricción operativa como los niveles de voltaje en sus extremos de envío y recepción.

1.2 Objetivo del trabajo de investigación

El objetivo de esta tesis, es encontrar una formulación que permita obtener un modelo de la línea de transmisión para hacer análisis completo de cargabilidad, de estudios de compensación y de control de perfil de voltaje en condiciones desbalanceadas. El estudio se centra en líneas de características muy comunes en sistemas eléctricos con configuraciones preferentemente radiales, formados por líneas de alto voltaje de gran longitud y desbalanceadas. El caso de estudio se basa en una línea de transmisión con estas características y que enlaza dos subestaciones del sistema eléctrico Mexicano, pero que representa típicamente los problemas operativos de un buen número de líneas de sistemas longitudinales.

Con este trabajo deberá de tenerse un criterio más amplio para determinar las condiciones de operación de una línea de transmisión, considerando también la presencia de cargas no lineales en el sistema.

1.3 Descripción del contenido del trabajo

Este trabajo de investigación consta de seis capítulos dedicados completamente al estudio y análisis de operación de las líneas de transmisión, donde el Capítulo 1 es dedicado a dar una breve revisión de los aspectos que motivaron al autor para la realización de esta tesis, así como sus objetivos principales.

El Capítulo 2, contiene la determinación de parámetros de la línea de transmisión, utilizando los procedimientos expuestos en las referencias [1, 3, 4, 5, 6], e implementando rutinas en MATLAB®. En el cálculo de circuitos equivalentes se utilizó una transformación modal diferente a componentes simétricas para los casos desbalanceados [7]. Además en este capítulo se presenta una formulación para la solución de flujos de potencia cuando los elementos están expresados en las constantes ABCD de la línea de transmisión, la cual se modela como una red de dos puertos para cada circuito modal equivalente, [3].

El Capítulo 3, contiene los estudios de compensación de las líneas operando en condiciones desbalanceadas, la solución se desarrolla en el dominio modal incluyendo las características principales de cada tipo de compensación. Se presentan aplicaciones e impactos en los estudios de estabilidad y del control de perfil de voltaje [2].

En el Capítulo 4, se presenta un desarrollo para estudios de máxima transferencia de potencia en por unidad del SIL [20] y de la cargabilidad para la línea de transmisión [19]. Se aplican los conceptos presentados en los capítulos anteriores con solución del sistema en el dominio modal y se hace un análisis detallado de los resultados obtenidos en las magnitudes de voltaje en los límites de cargabilidad de la línea. Se presenta una solución de sistemas interconectados por múltiples enlaces mediante una formulación trifásica [8].

El Capítulo 5 contiene un análisis estadístico de energización para una línea de transmisión a fin de determinar una característica de densidad de probabilidad de ocurrencia del tiempo más drástico de cierre de interruptores, así mismo se trata el desarrollo e interpretación de los resultados obtenidos mediante herramientas computacionales, tales como ATPdraw y JMP, para simular transitorios y estudios estadísticos respectivamente, [9] y [11].

El Capítulo 6 presenta un análisis del comportamiento de la línea de transmisión ante la presencia de cargas no lineales, la cual es importante para determinar frecuencias de resonancia, las cuales pueden provocar sobretensiones o sobrecorrientes en los elementos de compensación que componen el sistema de potencia.

Finalmente en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones del autor sobre el proyecto desarrollado y se anotan las posibles extensiones que pueden abordarse en trabajos futuros.

CAPITULO 2

DETERMINACION DE MODELOS EQUIVALENTES PARA ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA

2.1 Determinación de Parámetros para líneas aéreas de transmisión

2.1.1 Conductores Compuestos y el Radio Geométrico Equivalente

Los conductores compuestos o haces de conductores son utilizados con frecuencia en líneas de transmisión de extra alto voltaje (EHV). Este recurso es más utilizado que el uso de conductores expandidos que utilizan un relleno de papel entre sus diferentes capas de aluminio y acero para incrementar el radio del conductor, reducir de esta manera el gradiente de potencial en la superficie del conductor y a su vez el efecto corona.

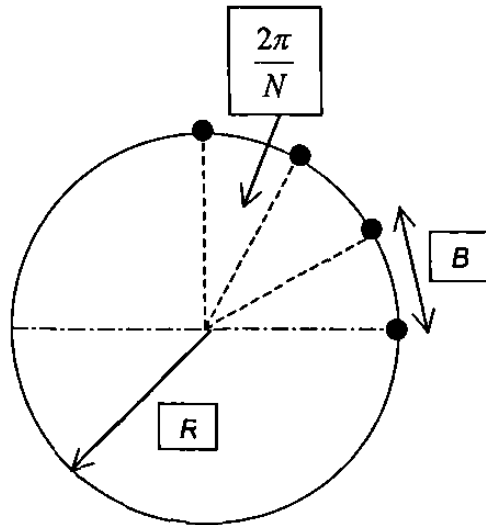


Fig. 2.1 Disposición geométrica de conductores en un haz.

B es el espaciamiento entre conductores adyacentes

R el radio del haz de conductores

N es el número de subconductores en un haz

La Figura 2.1, muestra las configuraciones utilizadas en cada fase de líneas de corriente alterna, o en cada polo de líneas de corriente directa.

Para un gran número de aplicaciones y en los cálculos correspondientes a haces formados por N subconductores, se puede reemplazar el arreglo por un conductor único con un radio equivalente. A este radio equivalente se le conoce como radio medio geométrico o simplemente radio equivalente y se calcula de la siguiente manera, como lo indica (2.1), [5].

$$r_{eq} = R * \left(N * \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (2.1)$$

Donde:

r Radio de cada subconductor, suponiendo N subconductores iguales

R Radio de la circunferencia de la configuración del haz

La ecuación anterior describe el radio equivalente de una configuración de conductores, se considera que el ordenamiento de los conductores es equidistante de manera que una circunferencia imaginaria pase a través de los N subconductores del haz.

Por ejemplo, para calcular el radio medio geométrico de un haz de conductores de una línea de EHV, 1,000 kV, que tiene seis subconductores de diámetro de 4.6 cm cada uno y una distancia $B = 12 d$, de separación entre subconductores adyacentes, en configuración circular, y cada subconductor separado de conductores adyacentes en 60 grados.

Si se observa la Figura 2.1, se tiene que para seis subconductores, el radio R es igual a la distancia B , que hay entre conductores adyacentes, de modo que el radio equivalente se calcula por:

$$r_{eq} = \sqrt[6]{6 r R^5} = \sqrt[6]{6 \left(\frac{0.046}{2} \right) [(12)(0.046)]^5} = 0.4381 \text{ mts.}$$

A medida que el número de subconductores se incrementa, el radio equivalente también aumenta, acercándose al radio R de la configuración del haz de conductores.

2.1.2 Resistencia Equivalente

Las líneas de Extra Alto Voltaje (EHV) son siempre conductores trenzados y generalmente los conductores más utilizados son de aluminio con refuerzo de acero (ACSR) o conductor de aluminio con refuerzo de aluminio (ACAR). Si se utiliza refuerzo de acero, debido a su alta permeabilidad e inductancia, la corriente tiende a circular por los hilos de aluminio externos, de modo que en los conductores tipo ACAR la sección transversal es mejor utilizada.

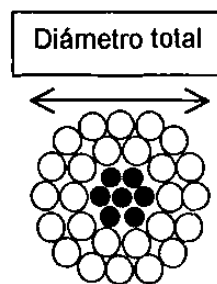


Fig. 2.2 Conductor trenzado 26 Al/7 Fe, en dos capas cada uno.

La resistencia de un conductor trenzado por cada kilómetro puede calcularse por (2.2), [5]

$$R = \rho_a * \frac{1.05 * 10^3}{\pi * d_s^2 \frac{n_s}{4}} \quad (2.2)$$

Donde:

- ρ_a Resistencia específica del aluminio, en ohms-km a una temperatura T.
- d_s Diámetro de cada hilo en metros.
- n_s Número de hilos de aluminio.

El factor de valor 1.05 toma en cuenta el incremento en la longitud del hilo debido al trenzado, considerando así un 5 % de aumento en la longitud efectiva.

Los efectos de la resistencia en conductores de EHV se pueden listar como:

- Pérdidas en la transmisión por calentamiento $I^2 R$.
- Reducción de la capacidad de conducción de corriente en regiones geográficas con altas temperaturas ambientales.
- Afecta la atenuación de la onda viajera debida a descargas atmosféricas y operaciones de maniobra.

2.1.3 Efecto Inductivo

El efecto inductivo de conductores que llevan una corriente alterna se puede dividir en un efecto interno al conductor y otra porción debida al flujo magnético exterior que se establece por la corriente que lleva el conductor.

2.1.3.1 Inductancia debida al flujo interno

Es la inductancia resultante al considerar el efecto piel del conductor.

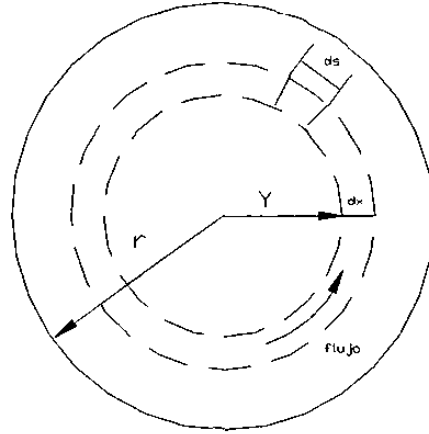


Fig. 2.3 Sección transversal de un conductor de radio r .

A una distancia Y del centro de conductor de radio r , donde $Y < r$, como lo muestra la Figura 2.3, la Ley circuital de Ampere está dada por (2.3), [17].

$$\oint H \cdot dL = I_{\text{encerrada}} \quad (2.3)$$

Considerando una densidad de corriente uniforme J , la corriente encerrada hasta la distancia Y es:

$$I_Y = \frac{Y^2 I}{r^2} \quad (2.4)$$

Entonces:

$$\oint H \cdot dL = H_r 2\pi Y = \frac{Y^2 I}{r^2} \quad (2.5)$$

La densidad de energía almacenada en el campo magnético es:

$$w_Y = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r H_Y^2 = \frac{I^2 \mu_0 \mu_r}{8 \pi^2 r^4} Y^2 \quad \text{Joules/m}^3 \quad (2.6)$$

Además, la energía total almacenada en el campo magnético, hasta el radio r , se puede calcular como:

$$\frac{1}{2} L_i I^2 = \int_0^r dW = \int_0^r 2\pi Y w_Y dY = \frac{\mu_0 \mu_r}{16 \pi} I^2 \quad (2.7)$$

Consecuentemente:

$$L_i = \frac{\mu_0 \mu_r}{8 \pi} \quad H/m \quad (2.8)$$

2.1.3.2 Inductancia en una línea de dos Conductores.

Si se considera dos conductores, cada uno de radio r y con una separación entre centros dada por D , conduciendo una corriente I y $-I$, se obtiene la expresión de los enlaces de flujo e inductancia.

Se puede considerar que el mismo efecto se puede obtener con un conductor único a una altura $H = D/2$ sobre el plano de tierra. Observando que una línea de flujo, externa a ambos conductores enlaza una corriente total cero, de modo que la intensidad de campo magnético es cero. Por lo tanto, todo el flujo existe entre los dos conductores, desde r hasta $D - r$.

Los enlaces de flujo del conductor 1, tiene dos componentes, la primera y debida a la corriente I , sin considerar el flujo interno.

$$\psi_{11} = \int_r^{D-r} d\psi_{11} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \int_r^{D-r} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \ln\left(\frac{D-r}{r}\right) \quad (2.9)$$

Al tomar en cuenta el efecto de la corriente en el segundo conductor y por la regla de Fleming [16], la cual muestra que el flujo debido a la corriente en el segundo conductor está en la misma dirección que el establecido por la corriente en el primer conductor. Entonces se encuentra que el flujo que enlaza al primer conductor, debido al segundo conductor, está dado por (2.10).

$$\psi_{12} = \int_r^{D-r} d\psi_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I \ln\left(\frac{D-r}{r}\right) \quad (2.10)$$

El flujo total que enlaza al primer conductor debido a las dos corrientes está dado por:

$$\psi_{11} + \psi_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} I \ln\left(\frac{D-r}{r}\right) \approx \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} I \ln\left(\frac{D}{r}\right) \quad (2.11)$$

Entonces, la inductancia de cualquiera de los conductores se encuentra por medio de (2.12).

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \ln \left(\frac{D}{r} \right) \quad H / m \quad (2.12)$$

para incluir el efecto completo de los haces de conductores se sustituye al radio r por el valor del radio geométrico medio, RMG.

2.1.3.3 Coeficientes de Maxwell

Para líneas con múltiples conductores, se considera una permeabilidad relativa $\mu_r = 1$ en (2.12), $L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2H}{r} \right)$ (H/m), donde el factor $P = \ln \left(\frac{2H}{r} \right)$ es conocido como Coeficiente de Maxwell, [5].

Cuando varios conductores se encuentran a diferentes alturas sobre el plano de tierra, cada uno con su propia corriente, el sistema de n conductores se puede analizar como n conductores en el espacio y sus respectivas imágenes bajo tierra, conduciendo la misma corriente pero en dirección opuesta.

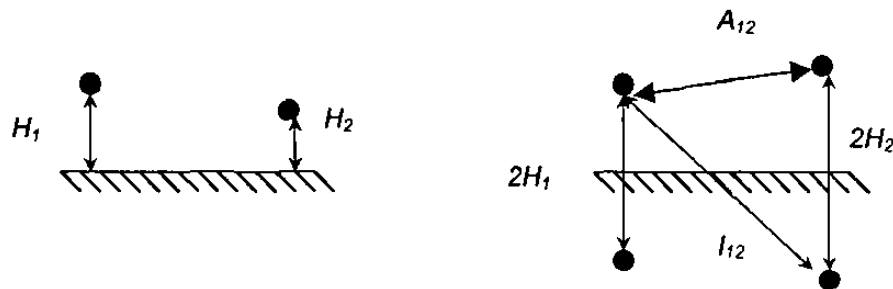


Fig. 2.4 Distancias en líneas multiconductores, con sus respectivas imágenes.

Los enlaces de flujo de cualquier conductor en una línea trifásica, tiene tres componentes: una componente debida a su propia corriente que se puede calcular por (2.9), y usando la permeabilidad relativa $\mu_r = 1$.

$$\psi_{11} = \frac{\mu_0}{2\pi} I_1 \ln \left(\frac{2H}{r} \right) \quad (2.13)$$

Usando el radio medio geométrico D_s , en lugar de r se tomará en cuenta el flujo interno del conductor, que es la segunda componente del flujo total. Considerando solamente las líneas de flujo que enlazan al conductor, pero debidas a la corriente que circula en el segundo conductor y su imagen, pero ignorando la presencia del resto de los conductores, se puede calcular la tercer componente del flujo por medio de (2.14), [5].

$$\psi_{12} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \left[I_2 \int_{A_{12}}^{\infty} \frac{dx}{x} - I_2 \int_{I_{12}}^{\infty} \frac{dx}{x} \right] = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_2 \ln \left(\frac{I_{12}}{A_{12}} \right) \quad (2.14)$$

El coeficiente mutuo de Maxwell, entre los conductores 1 y 2, deberá ser

$$P_{12} = \ln \left(\frac{I_{12}}{A_{12}} \right).$$

En general, es evidente que los coeficientes mutuos de Maxwell, para los enlaces de flujo del conductor i con el conductor j (y vice-versa), se pueden calcular mediante (2.15).

$$P_{ij} = \ln \left(\frac{I_{ij}}{A_{ij}} \right), \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2.15)$$

Así, para un sistema de n conductores, fases en el caso polifásico o polos en el caso de transmisión en CD, la matriz de enlaces de flujo queda expresada mediante (2.16).

$$[\Psi]_n = \frac{\mu_0 \mu_r}{2 \pi} [P]_{n \times n} [I]_n = [L]_{n \times n} [I]_n \quad (2.16)$$

Al considerar haces de conductores, el denominador de los coeficientes de Maxwell, debe sustituirse por un radio equivalente, radio medio geométrico, bajo las siguientes consideraciones [5].

- El espaciamiento B , entre subconductores adyacentes de un haz de configuración circular de radio R , es pequeño comparado con la altura H de los conductores de fase, sobre el plano de tierra.
- La corriente total en un haz es I y la corriente en cada subconductor es $i = I/N$.

Observando las ecuaciones para el valor de la inductancia, se tiene que al incrementar el número de subconductores en un haz, el radio equivalente se incrementa como lo muestra (2.1).

El coeficiente de Maxwell, dado por (2.15), se reduce dada la relación inversa respecto del radio equivalente, y por tanto la inductancia propia de cada fase disminuye.

2.1.4 Efecto Capacitivo

2.1.4.1 Cálculo de Capacitancia

Bajo la consideración de dos conductores separados una distancia $D = 2H$, con una carga de Q Coulombs/m y de polaridad opuesta, la fuerza ejercida sobre una carga de prueba positiva de valor unitario, colocada en un punto F a una distancia x del conductor 1, se tiene dada por (2.17), [5, 12].

$$E_F = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2H-x} \right) \text{ Newtons} \quad (2.17)$$

En consecuencia, se puede calcular la diferencia de potencial entre los dos conductores por medio de (2.18), [12]. Por simetría se puede determinar la diferencia de potencial entre el conductor y el plano de tierra, (2.19).

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \int_r^{2H-r} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{2H-x} \right] dx = \frac{Q}{\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2H-r}{r} \right) \approx \frac{Q}{\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2H}{r} \right) \text{ Volts} \quad (2.18)$$

$$V_g = 0.5V = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2H}{r} \right) \quad (2.19)$$

Como el logaritmo natural de $2H/r$, está multiplicado por un coeficiente de la carga en el conductor ($Q/2\pi\epsilon_0$), a este factor se le conoce como coeficiente de potencial de Maxwell, [5]. El coeficiente es el mismo que el usado para el cálculo de la inductancia. Se puede usar la Figura 2.4 del cálculo de inductancias para líneas multiconductores, pero aplicada ahora para el cálculo de capacitancias.

2.1.4.2 Conductores Agrupados

Para considerar conductores agrupados, se puede utilizar el concepto de radio medio geométrico, de la misma manera que se hizo para el cálculo de inductancias, cambiando r en el denominador de los elementos propios de la matriz P por r_{eq} , del haz de conductores.

2.1.5 Corrección de Carson

En condiciones de operación balanceadas, en una línea de transmisión, no existe circulación de corriente por el neutro; sin embargo, muchos estudios requieren incluir una corrección en los parámetros de la línea para tener una buena representación del efecto de retorno por tierra.

Para estudios tales como el análisis de corto circuito que involucren conexión a tierra, las operaciones de switcheo de interruptores, las descargas atmosféricas, y la propagación de ondas electromagnéticas en conductores, generalmente, se usa un método de corrección, conocido como Corrección de Carson [1, 4].

Al incluir el efecto de retorno por tierra, los parámetros de inductancia y resistencia se ven modificados. El efecto capacitivo solamente se modifica a altas frecuencias, de modo que incluyendo las Correcciones de Carson para la matriz de resistencias y de inductancias, respectivamente.

$$[R] = [R_c] + [R_g] = R_c [U] + R_g [D] = \begin{bmatrix} R_c + R_g & R_g & R_g \\ R_g & R_c + R_g & R_g \\ R_g & R_g & R_c + R_g \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$[L] = [L_c] + [L_g] = (L_s - L_m)[U] + (L_g + L_m)[D] = \begin{bmatrix} L_s + L_g & L_g + L_m & L_g + L_m \\ L_g + L_m & L_s + L_g & L_g + L_m \\ L_g + L_m & L_g + L_m & L_s + L_g \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Donde:

R_c , resistencia de cada conductor en ohms / km

R_g , corrección de Carson para la resistencia

L_g , corrección de Carson para la inductancia

L_s , inductancia propia de cada conductor

L_m , inductancia mutua entre conductores

D matriz cuadrada de unos, de acuerdo al número de conductores

U matriz unitaria

En la representación matricial anterior, se considera una línea perfectamente simétrica y transpuesta, de modo que todos los efectos propios son iguales entre ellos, al igual que los efectos mutuos.

Sin embargo, el análisis se lleva a cabo de manera similar para cualquier condición de desbalance de una línea de transmisión. El cálculo de las correcciones de Carson se efectúa de la siguiente manera [5].

1. Se calculan las distancias entre conductores e imágenes de conductores, similar a como se hizo para el cálculo de los coeficientes de Maxwell, además de los ángulos expresados como se muestra en la Figura 2.5.

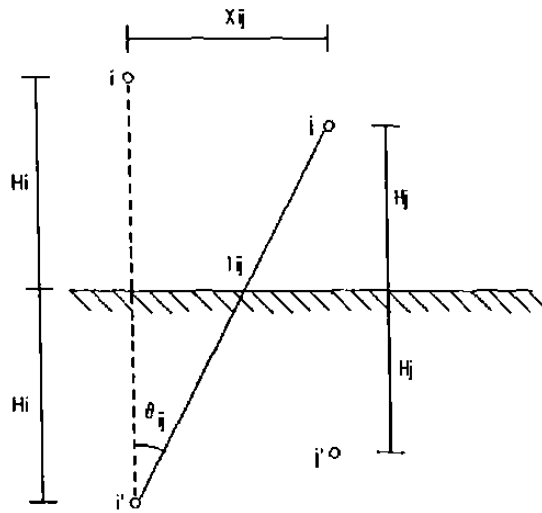


Fig. 2.5 Cálculo de distancias entre conductores y sus imágenes.

2.- Para reducir las ecuaciones se calcula el término:

$$F_{ij} = I_{ij} \sqrt{2 \pi \mu_0 f \sigma_s} \quad (2.27)$$

Donde: σ_s , conductividad del terreno en mho / m.

f , frecuencia de la corriente en Hz.

$G = 1.7811$, número de Euler.

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, permeabilidad magnética del vacío, H/m

I_{ij} Distancia del conductor i a la imagen del conductor j.

$\theta_{ij} = \arctan (X_{ij} / (H_i + H_j))$.

3. Se calculan las siguientes series:

$$S_2 = \sum_{K=0}^{\infty} (-1)^K \left(\frac{F_{ij}}{2} \right)^{2(2K+1)} \frac{1}{(2K+1)!(2K+2)!} \cos((2K+1)2\theta_{ij})$$

$$T_2 = \sum_{K=0}^{\infty} (-1)^K \left(\frac{F_{ij}}{2} \right)^{2(2K+1)} \frac{1}{(2K+1)!(2K+2)!} \sin((2K+1)2\theta_{ij})$$

$$S_4 = \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^{(K-1)} \left(\frac{F_{ij}}{2} \right)^{4K} \frac{1}{(K+1)!(K+2)!} \cos((4K)\theta_{ij})$$

$$T_4 = \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^{(K-1)} \left(\frac{F_{ij}}{2} \right)^{4K} \frac{1}{(K+1)!(K+2)!} \sin((4K)\theta_{ij})$$

$$W_1 = \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^{(K-1)} F_{ij}^{(4K-1)} \frac{1}{1^2 3^2 5^2 (4K-1)} \cos((4K-3)\theta_{ij})$$

$$W_3 = \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^{(K-1)} F_{ij}^{(4K-1)} \frac{1}{1^2 3^2 5^2 (4K+1)} \cos((4K-1)\theta_{ij})$$

$$W_2 = 1.25 S_2 \quad (2.28)$$

$$W_4 = \frac{5 S_4}{3}$$

En las ecuaciones (2.28), el valor máximo de K se determina por el orden de la corrección de Carson requerida. En algunos casos, después del segundo o tercer término, el valor de la inductancia y resistencia del efecto de retorno por tierra se ve modificado muy poco.

Para ciertas configuraciones geométricas y a bajas frecuencias de operación, como se observa en (2.28), después de un cierto valor de K , los cocientes de las sumatorias se hacen muy pequeños de manera que los términos de alto orden resultan ser despreciables en comparación con los términos de bajo orden.

4. Los términos calculados en el punto 3 se sustituyen en las siguientes expresiones:

$$J_R = (1 - S_4) \frac{\pi}{8} + 0.5 S_2 \ln \left(\frac{2}{G F_{ij}} \right) + 0.5 \theta_{ij} T_2 - \frac{1}{2} W_1 + \frac{1}{2\sqrt{2}} W_2 \quad (2.29)$$

$$J_I = 0.25 + 0.5 (1 - S_4) \ln \left(\frac{2}{G F_{ij}} \right) - 0.5 \theta_{ij} T_4 - \frac{\pi}{8} S_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} (W_1 + W_3) - 0.5 W_4$$

5. Finalmente, se obtienen los valores de las correcciones de Carson, como sigue:

$$R_g = 8 \pi f J_R 10^{-4}, \quad \text{ohms/km} \quad (2.30)$$

$$L_g = 4 J_I 10^{-4}, \quad \text{Henries/km}$$

Al sustituir los valores obtenidos mediante las series y ecuaciones anteriores, se puede obtener los valores de las correcciones y evaluar las matrices de inductancia y de resistencia que incluyen el efecto del retorno por tierra.

2.2 Matrices Equivalentes

Para obtener una matriz equivalente reteniendo solamente las fases, se efectúan reducciones para obtener el modelo requerido, es decir, sin hilos de guarda o sin identidad para los conductores que forman los haces.

2.2.1 Reducción de Kron

Una vez obtenidas las matrices de impedancia serie y de admitancias del efecto capacitivo, que modelan a la línea de transmisión, el siguiente paso es reducir el tamaño de estas matrices a un orden de 3x3 para retener el equivalente visto desde las fases abc. Para lograr el objetivo descrito se eliminan los renglones y las columnas correspondientes a los hilos de guarda y/o aquellos renglones que corresponden a los subconductores que forman parte de un haz. La eliminación de los hilos de guarda se hace utilizando la reducción de Kron [1, 3], la cual es un caso particular de la eliminación Gaussiana, dado que la estructura de las ecuaciones del comportamiento eléctrico tienen la forma dada por (2.31).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_g \\ \Delta V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ag} & Z_{aw} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} & Z_{bw} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cg} & Z_{cw} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gg} & Z_{gw} \\ Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} & Z_{wg} & Z_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \\ I_w \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

En forma particular los hilos de guarda están conectados a tierra en sus extremos, en líneas de alto voltaje generalmente se aterrizan en cada estructura, de modo que los voltajes $\Delta V_g = \Delta V_w = 0$, y (2.31) queda de la forma (2.32), a la cual se aplica la reducción de Kron.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ag} & Z_{aw} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} & Z_{bw} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cg} & Z_{cw} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gg} & Z_{gw} \\ Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} & Z_{wg} & Z_{ww} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \\ I_w \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_b \\ Z_c & Z_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{gw} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

A la expresión (2.33) se le aplica la reducción de Kron, considerando una partición en la expresión anterior, y se despejan las corrientes asociadas a los hilos de guarda.

$$I_{gw} = -Z_d^{-1} Z_c I_{abc} \quad (2.34)$$

y sustituir la expresión:

$$\begin{aligned} V_{abc} &= Z_a I_{abc} - Z_b Z_d^{-1} Z_c I_{abc} \\ V_{abc} &= [Z_{abc}] I_{abc} \end{aligned} \quad (2.35)$$

La matriz equivalente de fases Z_{abc} , está dada por:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ag} & Z_{aw} \\ Z_{bg} & Z_{bw} \\ Z_{cg} & Z_{cw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gw} \\ Z_{wg} & Z_{ww} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} \\ Z_{wa} & Z_{wb} & Z_{wc} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

El mismo procedimiento puede aplicarse para el caso en que una o más fases de un circuito esten formadas por dos o más conductores.

La finalidad es obtener una matriz reducida equivalente de dimensión 3x3, que incluya los efectos de todos los conductores. Por ejemplo en el caso de un circuito compuesto por cuatro conductores, una fase compuesta por dos conductores, tiene una expresión de la forma (2.37).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_{a'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{aa'} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{ba'} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{ca'} \\ Z_{a'a} & Z_{a'b} & Z_{a'c} & Z_{a'a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_{a'} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Donde $V_a = V_{a'}$ y la corriente total en la fase a es la suma de las corrientes $I_a + I_{a'}$, de modo que si al último renglón se le resta el primero, se obtiene una expresión similar a la del caso de los hilos de guarda y la expresión (2.38) se le modifica la tercera columna, para que aparezca la corriente total de la fase a. Posteriormente se le aplica el mismo procedimiento de despejar la corriente en el conductor $I_{a'}$, con el fin de sustituirlo en las tres primeras ecuaciones. Se obtiene finalmente una matriz de fase equivalente en (2.39).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_{a'} - V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{aa'} - Z_{aa} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{ba'} - Z_{ba} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{ca'} - Z_{ca} \\ Z_{a'a} - Z_{aa} & Z_{a'b} - Z_{ab} & Z_{a'c} - Z_{ac} & Z_{a'a'} - Z_{aa'} - Z_{a'a} + Z_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a + I_{a'} \\ I_b \\ I_c \\ I_{a'} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$V_{abc} = Z_a I_{abc} - Z_b Z_d^{-1} Z_c I_{abc} \quad (2.39)$$

$$V_{abc} = [Zabc] I_{abc}$$

La matriz Z_{abc} está definida por:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa'} - Z_{aa} \\ Z_{ba'} - Z_{ba} \\ Z_{ca'} - Z_{ca} \end{bmatrix} [Z_{a'a'} - Z_{aa'}]^{-1} \begin{bmatrix} Z_{a'a} - Z_{aa} & Z_{a'b} - Z_{ab} & Z_{a'c} - Z_{ac} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Con el procedimiento descrito se podrá llegar a una matriz equivalente de 3x3, sin importar el número hilos de guarda y de conductores por fase, que forman la línea de transmisión. Una vez reducidas las matrices de impedancias y de admitancias a matrices equivalentes de 3x3, se puede aplicar una normalización para tener todo el sistema en una base común de potencia; usando generalmente el voltaje nominal de operación de la línea.

A partir de las matrices equivalentes de fase obtenidas se puede determinar los modos de propagación de las ondas electromagnéticas en la línea de transmisión, para esto se calculan los vectores derechos de una transformación modal [4, 5].

Con los valores propios de la transformación modal, los cuales representan impedancias y admitancias modales, se puede calcular los parámetros de tres equivalentes modales para una línea de transmisión que sea modelada con parámetros distribuidos. Este tipo de procedimientos se discute en la siguiente sección.

2.3 Equivalentes Modales

2.3.1 Modos de Propagación

2.3.1.1 Línea de Transmisión Completamente Transpuesta

El análisis de propagación de ondas en una línea de transmisión se lleva a cabo por medio de los parámetros que la caracterizan, los cuales son: velocidad de propagación, la atenuación y la impedancia característica. Por medio de las ideas propuestas por Fortescue [3, 21], las ondas en líneas multiconductores se pueden resolver usando modos de propagación.

Para el procedimiento de diagonalización de las matrices de parámetros que determinan la propagación de las ondas, primero se considera la diagonalización de una matriz de inductancias de una línea completamente transpuesta.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Evaluando las raíces del determinante, tal que $\lambda [U] - [L] = 0$:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= L_s + 2L_m \\ \lambda_2 &= L_s - L_m \\ \lambda_3 &= L_s - L_m \end{aligned} \quad (2.42)$$

Se calculan los vectores característicos derechos, vectores columna, correspondientes a la matriz de transformación T , de modo que $\lambda_n [U] - [L] = [0]$.

$$T^{-1} [L] T = \begin{bmatrix} L_s + 2L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_s - L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_s - L_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & L_2 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Las inductancias en la matriz diagonalizada, corresponden a cada uno de los modos de propagación. Del mismo modo se diagonaliza la matriz de capacitancias y al no tomar en cuenta el efecto de retorno por tierra, en el cálculo de la inductancia, se obtiene exactamente la misma velocidad de propagación para los tres modos.

$$\begin{aligned} L_0 C_0 &= \frac{1}{g^2} \\ L_1 C_1 &= \frac{1}{g^2} \\ L_2 C_2 &= \frac{1}{g^2} \end{aligned} \quad (2.44)$$

El efecto de retorno por tierra sobre la inductancia, reduce la velocidad de propagación en los modos que involucran tierra, dependiendo de la resistividad del terreno.

2.3.1.2 Modelo π para Línea con Parámetros Distribuidos

Para una mejor representación de una línea de transmisión, es necesario tomar en cuenta que los parámetros de la línea están distribuidos uniformemente en toda su longitud. Una forma comunmente utilizada es la suposición de que la línea está compuesta por n circuitos π equivalentes conectados en cascada; como lo muestra la Figura 2.6. El análisis se efectuá a través de un elemento diferencial de la línea, a una distancia x del extremo de recepción.

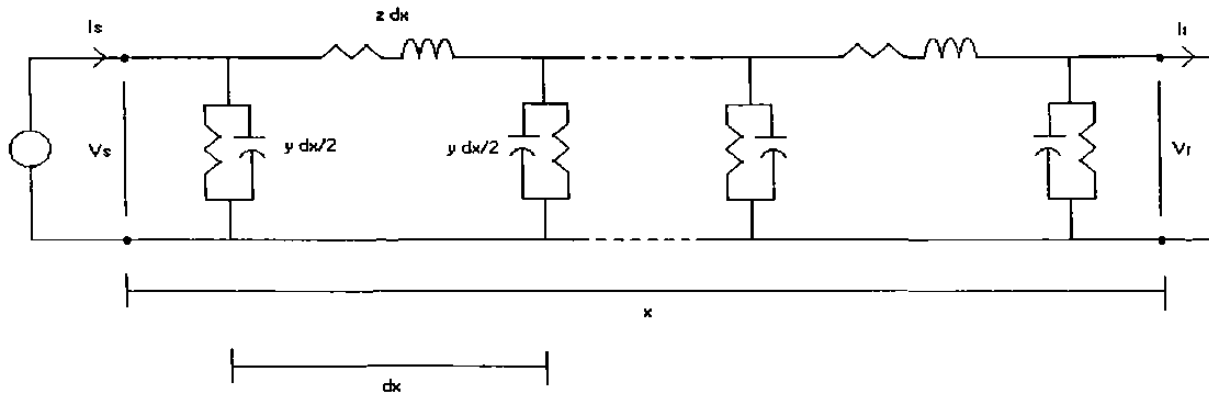


Fig. 2.6 Línea de transmisión con parámetros distribuidos.

Con este procedimiento, el modelo del elemento diferencial de la línea tendrá como parámetros a $z dx$ e $y dx$, elementos serie y en derivación respectivamente. V e I son los fasores de voltaje y corriente que varían con x . En la Figura 2.7, se muestra una sección elemental para la línea de transmisión que se modela con parámetros distribuidos. El objetivo es escribir las ecuaciones del circuito equivalente.

$$dV = z dx \left(I + \frac{dI}{2} \right) = z dx I + z \frac{dx dI}{2} \approx z dx I \quad (2.45)$$

$$\frac{dI}{2} = \frac{y}{2} dx (V + dV) = y \frac{dx}{2} V + y \frac{dx dV}{2} \approx y \frac{dx}{2} V$$

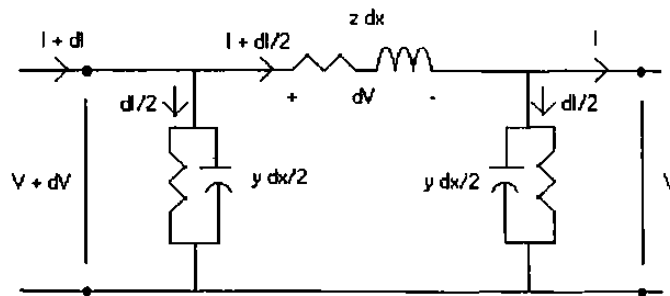


Fig. 2.7 Sección elemental de la línea de transmisión.

Despejando dx de las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$\frac{\partial V^{abc}}{\partial X} = Z^{abc} I(X, t)^{abc}$$

$$\frac{\partial I^{abc}}{\partial X} = Y^{abc} V(X, t)^{abc}$$
(2.46)

Derivando respecto a x y sustituyendo:

$$\frac{\partial^2 V^{abc}}{\partial X^2} = Z^{abc} \frac{\partial I^{abc}}{\partial X} = Z^{abc} Y^{abc} V(X, t)^{abc}$$

$$\frac{\partial^2 I^{abc}}{\partial X^2} = Y^{abc} \frac{\partial V^{abc}}{\partial X} = Y^{abc} Z^{abc} I(X, t)^{abc}$$
(2.47)

Se tiene una ecuación diferencial homogénea de la forma dada por (2.48).

$$Y'' - aY = 0$$
(2.48)

La solución a (2.48) tiene la forma siguiente:

$$Y = A_1 e^{s_1 x} + A_2 e^{-s_1 x}$$

Donde :

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{a}$$

Al substituir la solución en las ecuaciones de las primeras derivadas, para determinar las constantes de la solución propuesta:

$$\frac{dV}{dx} = z I = \frac{d(A_1 e^{\sqrt{zy}x} + A_2 e^{-\sqrt{zy}x})}{dx} = \sqrt{zy} (A_1 e^{\sqrt{zy}x} - A_2 e^{-\sqrt{zy}x}) \quad (2.49)$$

Despejando la corriente:

$$I = \sqrt{\frac{zy}{z^2}} (A_1 e^{\sqrt{zy}x} - A_2 e^{-\sqrt{zy}x}) \quad (2.50)$$

Si se toma como referencia el extremo receptor, cuando $X = 0$, $V = V_R$ e $I = I_R$:

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (2.51)$$

$$I_R = \frac{1}{\sqrt{\frac{z}{y}}} (A_1 - A_2) = \frac{1}{Z_c} (A_1 - A_2)$$

$Z_c = \sqrt{z/y}$ es la impedancia característica de la línea de transmisión.

Se despeja y se substituye para encontrar los valores de los coeficientes:

$$A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} \quad y \quad A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} \quad (2.52)$$

Entonces, las ecuaciones quedan finalmente como:

$$V = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (2.53)$$

$$I = \frac{V_R + Z_C I_R}{2 Z_C} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2 Z_C} e^{-\gamma x}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.54)$$

Con γ como constante de propagación. Con α como constante de atenuación, se mide en nepers/km, y representa la atenuación exponencial de la onda electromagnética por unidad de longitud. β es la constante de fase, se mide en radianes/km, y representa un cambio de fase de β radianes por cada unidad de longitud que recorre la onda electromagnética.

$$V = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\alpha x} e^{j\beta x} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (2.55)$$

Se puede definir un voltaje E' y E'' :

$$E' = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\alpha x} e^{j\beta x} \quad (2.56)$$

$$E'' = \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}$$

Al voltaje E' se le conoce como voltaje incidente y a E'' como voltaje reflejado.

La longitud de onda entre dos puntos que difieren en 2π radianes se le conoce como λ y tiene unidades de longitud. La velocidad de propagación de la onda es η .

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad m \quad (2.57)$$

$$\eta = \lambda f = \frac{2\pi f}{\beta} \quad m / seg \quad (2.58)$$

Una forma común de escribir las ecuaciones, es en forma hiperbólica:

$$\sinh \theta = \frac{e^{\theta} - e^{-\theta}}{2} \quad (2.59)$$

$$\cosh \theta = \frac{e^{\theta} + e^{-\theta}}{2}$$

Entonces:

$$V = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\gamma x}$$

$$V = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) + V_R e^{-\gamma x}$$

$$V = I_R Z_C \sinh(\gamma x) + \frac{V_R}{2} (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})$$

$$V = I_R Z_C \sinh(\gamma x) + V_R \cosh(\gamma x)$$

(2.60)

De la misma manera, para la corriente se tiene.

$$I = I_R \cosh(\gamma x) + \frac{V_R}{Z_C} \sinh(\gamma x) \quad (2.61)$$

Para una longitud total de la línea d , las ecuaciones que relacionan el voltaje y la corriente en los extremos de envío y recepción son:

$$V_S = V_R \cosh(\gamma d) + I_R Z_C \sinh(\gamma d) \quad (2.62)$$

$$I_S = I_R \cosh(\gamma d) + \frac{V_R}{Z_C} \sinh(\gamma d)$$

El circuito π equivalente, para una línea de transmisión de parámetros distribuidos es mostrado en la Figura 2.8.

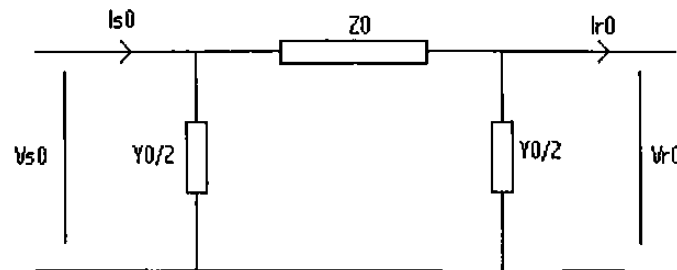


Fig. 2.8 Equivalente π de la línea de transmisión, modelada con parámetros distribuidos.

Donde:

$$Z_o = Z_c \sinh(\gamma d)$$

$$\frac{Y_o}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma d}{2}\right)$$
(2.63)

2.3.1.3 Constantes ABCD de la Línea de Transmisión.

Aplicando la teoría de redes de dos puertos [3], se establece que cualquier señal de entrada o de salida puede expresarse como una combinación lineal.



Fig. 2.9 Red de dos puertos.

$$V_s = A V_r + B I_r$$

$$I_s = C V_r + D I_r$$
(2.64)

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

Al resolver los circuitos equivalentes, para el circuito de la Figura 2.7, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 V_{S0} &= \left(\frac{Y_o}{2} Z_o + 1 \right) V_{R0} + Z_o I_{R0} \\
 I_{S0} &= \left(\frac{Y_o}{2} Z_o + 2 \right) \frac{Y_o}{2} V_{R0} + \left(\frac{Y_o}{2} Z_o + 1 \right) I_{R0}
 \end{aligned} \tag{2.65}$$

Al sustituir los valores para Z_o y $Y_o/2$, se obtiene que las constantes ABCD de la red de dos puertos quedan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 A &= \cosh(\gamma d) \\
 B &= Z_c \sinh(\gamma d) \\
 C &= \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma d) \\
 D &= \cosh(\gamma d)
 \end{aligned} \tag{2.66}$$

Despejando las variables del extremo de recepción:

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{AD - BC} \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$AD - BC = 1$$

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma d) & -Z_c \sinh(\gamma d) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma d) & \cosh(\gamma d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix}$$

2.3.1.4 Línea de Transmisión No Transpuesta

En líneas no transpuestas el análisis no es muy diferente, sólo que en esos casos la matriz de transformación T , debe evaluarse para cada caso particular. Esta necesidad se presenta debido a las características de las matrices de inductancia, capacitancia, resistencia, e impedancias características. En sistemas de potencia reales, las matrices no son simétricas debido a que los efectos mutuos entre fases no son iguales, de modo que después de efectuar el cálculo de parámetros para la línea de transmisión, se debe calcular una matriz de transformación para cada matriz; de capacitancias, de inductancias y de resistencias.

Las matrices de transformación para las matrices de inductancias y capacitancias modales son de características muy similares y con valores semejantes, dado que ambas se calculan a partir de la matriz P de coeficientes de Maxwell. Los vectores característicos de estas transformaciones modales expresan el comportamiento de los modos de propagación de las ondas electromagnéticas en la línea de transmisión. El signo de cada elemento en cada vector denota la dirección de propagación, como lo muestra la Figura 2.10, para los vectores derechos dados en la Tabla 2.1, obtenidos del análisis de una línea de transmisión típica de 400 kv, ver apéndice A, sin considerar efecto de retorno por tierra.

Tabla 2.1 Vectores derechos

Vectores Derechos		
0.5361	-0.7071	0.4611
0.652	0	-0.7582
0.5361	0.7071	0.4611

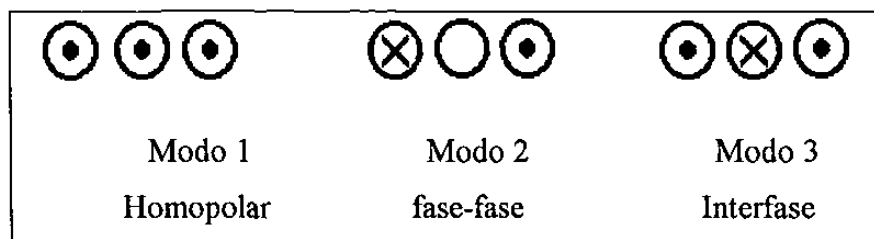


Fig. 2.10 Representación de vectores derechos.

El punto y la cruz de la Figura 2.10, denotan sentidos opuestos de propagación, de acuerdo con los valores de los elementos de los vectores derechos de la Tabla 2.1. Se puede observar que para el modo fase-fase solamente participan dos conductores.

Los valores característicos de cada matriz, tienen el mismo significado que en el caso de matrices para líneas balanceadas. Con ellos, se puede determinar la velocidad de propagación de cada modo, la cuál debe ser de valor semejante a la velocidad de la luz; si el efecto de retorno por tierra con corrección de Carson no es incluido en el estudio.

La obtención de los circuitos equivalentes se hace partiendo de las ecuaciones encontradas para el modelo de la línea de transmisión con parámetros distribuidos.

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} = z y V \quad (2.68)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx} = y z I$$

Si se considera una transformación modal para el voltaje y otra para la corriente, se tiene:

$$V = T_v V_M \quad (2.69)$$

$$I = T_i I_M$$

Al sustituir en (2.68):

$$\frac{d^2 (T_v V_M)}{dx^2} = Z Y T_v V_M \quad (2.70)$$

$$\frac{d^2 (T_i I_M)}{dx^2} = Y Z T_i I_M$$

Las matrices T_v y T_i corresponden directamente a los vectores característicos de las matrices de impedancia y admitancia respectivamente, como se observó en (2.16) y (2.21) ambas matrices tanto la de impedancias como la de admitancias se derivan de una misma matriz de potenciales de Maxwell, de manera que las matrices T_v y T_i tendrán elementos muy semejantes, la diferencia principal entre ellas es generada por la consideración del efecto de retorno por tierra producido por las correcciones de Carson, si se despreciara el efecto de retorno por tierra en los estudios realizados en esta tesis una de ellas sería suficiente para realizar los análisis.

Sin embargo durante toda la formulación se utilizarán las dos debido a que se toma en cuenta dicha corrección de Carson y además para no olvidar que esta herramienta puede aplicarse en otras áreas de interés para los ingenieros en el estudio de los sistemas eléctricos y pudieran requerirse ambas matrices de transformación.

Despejando las derivadas de los valores modales se obtiene:

$$\frac{d^2(V_M)}{dx^2} = T_v^{-1} Z Y T_v V_M = \{T_v^{-1} Z T_i\} \{T_i^{-1} Y T_v\} V_M \quad (2.71)$$

$$\frac{d^2(I_M)}{dx^2} = T_i^{-1} Y Z T_i I_M = \{T_i^{-1} Y T_v\} \{T_v^{-1} Z T_i\} I_M$$

Finalmente, con los valores de Z e Y modales se calculan las constantes de propagación, las impedancias características, las velocidades de propagación, etc., mediante (2.72) o (2.73).

$$\frac{d^2(V_M)}{d x^2} = Z_M Y_M V_M \quad (2.72)$$

$$\frac{d^2(I_M)}{d x^2} = Y_M Z_M I_M$$

Ecuaciones diferenciales, primeras derivadas :

$$\frac{d V_M}{d x} = T_v^{-1} Z T_i I_M = Z_M I_M \quad (2.73)$$

$$\frac{d I_M}{d x} = T_i^{-1} Y T_v V_M = Y_M V_M$$

2.3.2 Equivalentes Modales π y Solución de Flujos

Se puede establecer que los parámetros del iésimo modo estan dados como:

$$Z_i = Z_{Ci} \sinh(\gamma_i d) \quad (2.74)$$

$$\frac{Y_i}{2} = \frac{1}{Z_{Ci}} \tanh\left(\frac{\gamma_i d}{2}\right)$$

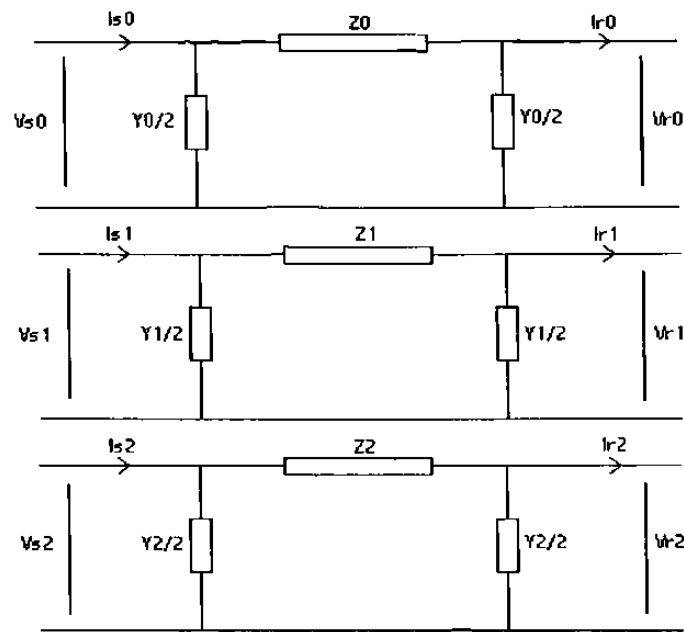


Fig. 2.11 Circuitos modales π equivalentes, con parámetros distribuidos.

Se puede plantear el problema de flujos de potencia, para el sistema mostrado en la Figura 2.12, con una línea trifásica.

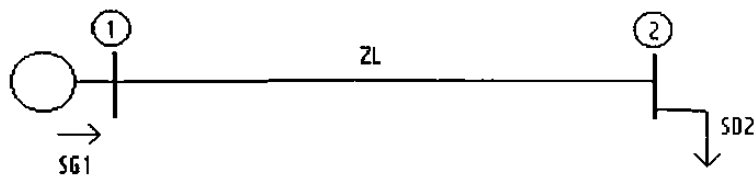


Fig. 2.12 Sistema radial.

Donde:

$$S_{D2} = V_2 I_2^* \quad \longrightarrow \quad I_2 = \frac{S_{D2}^*}{V_2^*} \quad (2.75)$$

Con la ley de voltajes y usando las ecuaciones obtenidas para la línea, con las constantes ABCD, para una red de dos puertos.

$$V_1 = V_2 + Z_C I_2 = V_2 + Z_C \frac{S_{D2}^*}{V_2^*} \quad (2.76)$$

$$\left. \begin{array}{l} V_S = A V_R + B I_R \\ I_S = C V_R + D I_R \end{array} \right\} \longrightarrow V_R = \frac{V_S}{A} - \frac{B}{A} I_R = \frac{V_S}{A} - \frac{B}{A} \frac{S_{DR}^*}{V_R^*} \quad (2.77)$$

Despejando la potencia, con los valores de las constantes ABCD.

$$S_{DR}^* = P_R - jQ_R = \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \angle(\delta_S - \delta_R - \delta_B) - \frac{|A||V_R|^2}{|B|} \angle(\delta_A - \delta_B) \quad (2.78)$$

$$P_R = \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \cos(\delta_S - \delta_R - \delta_B) - \frac{|A||V_R|^2}{|B|} \cos(\delta_A - \delta_B) \quad (2.79)$$

$$Q_R = \frac{|A||V_R|^2}{|B|} \sen(\delta_A - \delta_B) - \frac{|V_S||V_R|}{|B|} \sen(\delta_S - \delta_R - \delta_B)$$

Para la potencia de envío resultan ecuaciones similares, sin embargo en la solución de flujos no serán requeridas, ya que pertenecen al nodo considerado como referencia o compensador.

La formación de la matriz Jacobiana o matriz de primeras derivadas del método de Newton-Rapshon [1, 3], requiere de elementos como se muestra en (2.80).

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

El método iterativo de Newton-Rapshon, consiste en encontrar correcciones a las magnitudes y a los ángulos nodales, de modo que se reduzcan los errores de diferencia entre las potencias calculadas con (2.79) y las potencias especificadas para los nodos de carga. El procedimiento calcula actualizaciones o correcciones a los valores supuestos de magnitud de voltaje y de ángulos nodales, por medio de la expresión (2.81). El método iterativo converge cuando se cumple con una tolerancia especificada en los desajustes de potencia.

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

Debe observarse que la solución de flujos de potencia se efectuará en el dominio modal, por lo que se debe tener cuidado de que las potencias especificadas se encuentren expresadas también en el dominio de los modos. Para llevar a cabo esta transformación, se hace la consideración de tener un voltaje nominal en el extremo receptor, de modo que se pueda calcular las corrientes de fase. Se aplica por separado las respectivas transformaciones a los voltajes nodales y a las corrientes de fase, para posteriormente hacer la multiplicación del vector de voltajes por el vector conjugado de corrientes modales; de ésta manera se obtiene un vector de potencias modales.

También debe satisfacerse, en el caso de un sistema completamente balanceado, que al aplicar componentes simétricas y dado que la única red equivalente que tiene alimentación de voltaje es la red de secuencia positiva, toda la potencia debe entregarse por esta red, bajo los siguientes valores:

$$[V_{ABC}] = \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ \\ 1 \angle -120^\circ \\ 1 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

$$[S_{ABC}] = \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}$$

De la forma anterior se puede calcular las corrientes balanceadas de cada fase y aplicar a continuación la transformación modal. Al calcular la potencia modal total, entregada por la red de secuencia positiva, se obtiene el valor de 2 pu.

Tabla 2.2 Corrientes de fase y componentes modales.

$[I_{ABC}] = \begin{bmatrix} 2 \angle 0^\circ \\ 2 \angle -120^\circ \\ 2 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$	$I_{\text{mod}} = T_s^{-1} [I_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix}$ $V_{\text{mod}} = T_s^{-1} [V_{ABC}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix}$
---	---

Si se aplica la transformación inversa, se encuentra la potencia entregada por cada fase. Es importante que la transformación modal utilizada sea de potencia invariante, es decir que si se utiliza no modifique los valores de potencia al ser calculados en las fases o en los modos.

Bajo este principio la potencia entregada debe ser la misma independientemente de la manera en que se represente la red eléctrica. Para un sistema completamente balanceado se utiliza como transformación modal la transformación de Componentes Simétricas en la solución del sistema.

El circuito modal equivalente de secuencia positiva, para el cálculo del voltaje en el extremo generador, se muestra en la Figura 2.13. Un análisis de flujos de potencia para determinar el voltaje en el extremo receptor, a partir de un voltaje de referencia en el extremo generador, como generalmente es requerido se tiene en la Figura 2.13.

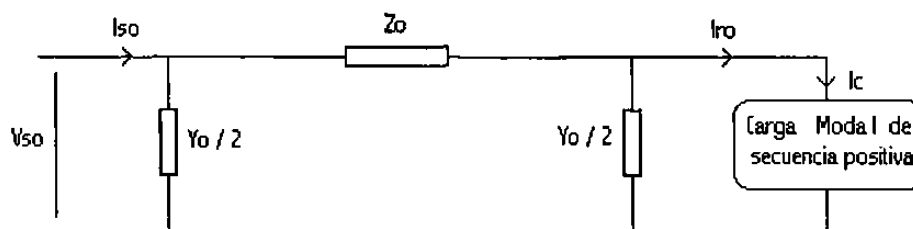


Fig. 2.13 Equivalente modal para el estudio de flujos de carga.

La Tabla 2.3 muestra la solución de flujos de potencia desbalanceados de la formulación anterior, para el caso de la Figura 2.12 de una línea de transmisión con las características del apéndice A, y en el caso que se alimenta una carga trifásica de 5500 MW.

Tabla 2.3 Solución de flujos de potencia desbalanceados

Voltajes de Fase en el extremo de Envío		
	Magnitud	Angulo
	1.0000	-0.0000
	1.0000	-120.0000
	1.0000	120.0000
Corrientes de Fase en el extremo de Envío		
	Magnitud	Angulo
	1.7411	2.3945
	1.9884	-109.7393
	2.2086	121.6360

Voltajes de Fase en el extremo de Recepción	
Magnitud	Angulo
0.8736	-23.8071
0.9664	-142.8843
0.9933	93.1074
Corrientes de Fase en el extremo de Recepción	
Magnitud	Angulo
1.8814	-27.4453
1.8838	-141.7783
2.0574	95.0444
Potencia Real de Envío (Mwatts):	590.39
Potencia Reactiva de Envío (Mvars):	-49.00
MVAs:	592.42
Potencia Activa de Recepción (Mwatts):	550.28
Potencia Reactiva de Recepción (vars):	0.01

2.3.3 Desbalances en Líneas de Transmisión de doble circuito.

Para la configuración de este tipo de líneas existe dos clases de desbalances: el primero es esencialmente el ya analizado, como la falta de transposición de cada línea de transmisión y el posible desbalance de la carga. El segundo es un desbalance “circulante” el cual se expresa en porcentaje y no es afectado por la carga. El segundo tipo de desbalance, se origina por la diferencia que existe entre los potenciales de secuencia cero y secuencia negativa, que provocan una corriente circulante a través del circuito.

La diferencia entre los potenciales es debida a que las corrientes de secuencia cero y de secuencia negativa que circulan en el circuito I, inducen en ambos circuitos estos potenciales; los cuales no son iguales a los potenciales inducidos en ambos circuitos por la corriente en el circuito II. La causa de este desbalance es la aplicación de potenciales de secuencia positiva *asimétricos*, con respecto a la geometría *simétrica* de la línea.

Una forma de determinar el grado de desbalance [18] en las líneas de transmisión, tanto para circuitos simples como para circuitos dobles o en general para cualquier número de circuitos, es llevar a cabo una reducción en la matriz de impedancias utilizando la herramienta de la reducción de Kron, mostrada en la sección 2.2.

Las dimensiones de la matriz resultante depende del número de fases, circuitos del arreglo e hilos de guarda que forman la línea de transmisión, la cual será reducida hasta obtener una matriz equivalente de 3x3, mediante las expresiones (2.31 a 2.40). Si se aplica la transformación de componentes simétricas a un sistema de transmisión desbalanceado que es el estado más común de los sistemas eléctricos, se obtiene una matriz equivalente de impedancias de secuencia que no se encuentra totalmente desacoplada, y la matriz resultante tiene una forma llena.

$$[Z_{012}] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

El grado de desbalance se puede determinar mediante los valores de las impedancias de secuencia. De la siguiente manera [18]:

$$\begin{aligned} |M_0| &\approx \left| \frac{Z_{01}}{Z_{00}} \right| * 100 \\ |M_2| &\approx \left| \frac{Z_{21}}{Z_{11}} \right| * 100 \end{aligned} \quad (2.84)$$

Si se dispone de las corrientes de secuencia de cada circuito, se puede determinar el factor de desbalance máximo en la red, con las expresiones siguientes [18]:

$$\%|M_0| = \left| \frac{i_0^{(1)} + i_0^{(2)}}{i_1^{(1)} + i_1^{(2)}} \right| * 100 \quad (2.85)$$

$$\%|M_2| = \left| \frac{i_2^{(1)} + i_2^{(2)}}{i_1^{(1)} + i_1^{(2)}} \right| * 100$$

El desbalance debido a las corrientes circulantes:

$$\%|M_0^C| = \left| \frac{i_0^{(1)} - i_0^{(2)}}{i_1^{(1)} + i_1^{(2)}} \right| * 100 \quad (2.86)$$

$$\%|M_2^C| = \left| \frac{i_2^{(1)} - i_2^{(2)}}{i_1^{(1)} + i_1^{(2)}} \right| * 100$$

Pueden analizarse diferentes arreglos de fases de cada uno de los circuitos y determinar cuál es el arreglo más conveniente, de manera que se tenga el menor desbalance, tanto el producido por la red como el debido a las corrientes circulantes que son inducidas por los voltajes de secuencia negativa y secuencia cero.

2.4 Observaciones

En la planeación de la construcción de líneas de transmisión de gran longitud y de alto voltaje es importante observar los efectos benéficos que puede tener el usar haces de conductores. Si se sustituye en (2.12) el valor de r por el valor del radio medio geométrico se observa cómo el cociente del logaritmo se hace más pequeño; debido a que el haz de conductores hace más grande el valor del radio medio geométrico que el valor del radio de un solo conductor.

Durante la planeación se debe estudiar a detalle la estructura que se usará en la línea de transmisión, debido al efecto que tienen las distancias y el arreglo geométrico sobre las impedancias y las admitancias.

La corrección de Carson toma en cuenta el retorno por tierra, y en caso de que se trate de un sistema balanceado, las velocidades de propagación calculadas mediante (2.58) o como se observa en (2.44) son muy cercanas a la velocidad de la luz. Sin embargo, para líneas desbalanceadas, las velocidades de propagación se reducen en los modos que involucran un retorno por tierra; como se muestra por ejemplo en los vectores derechos de la Tabla 2.1.

Las herramientas matemáticas para el análisis de los sistemas eléctricos permiten representar los sistemas de transmisión de manera más adecuada, representando los elementos de los sistemas eléctricos con modelos más precisos que los modelos actualmente utilizados. Los resultados permiten dar a los ingenieros encargados de la planeación y de la operación de los sistemas eléctricos, el suficiente conocimiento para tomar decisiones seguras y acertadas de control.

CAPITULO 3

ANALISIS DE COMPENSACION DE LINEAS DE TRANSMISION BALANCEADAS Y DESBALANCEADAS

3.1 Conceptos de Compensación

Existen dos tipos de compensación en líneas de transmisión, compensación serie y compensación en paralelo. La compensación serie en las líneas de transmisión se lleva a cabo con la finalidad de mejorar la seguridad de la operación del sistema eléctrico, incrementando la capacidad de transferencia de potencia al reducir la impedancia serie. Con la compensación en paralelo se tiene un efecto adicional y se logra al mantener un buen soporte de voltaje al disponer de potencia reactiva en el extremo receptor, así como el reducir ciertos efectos transitorios.

3.1.1 Compensación en Paralelo

El modelado de elementos de compensación en derivación, los cuales pueden ser ubicados en el extremo receptor de una línea de transmisión, depende del elemento que se trate. Por ejemplo para incluir un compensador síncrono se puede hacer la consideración de que la potencia reactiva que entrega se mantiene constante y se modela como una carga que se adiciona a la ya ubicada en el extremo receptor.

En el caso de un elemento pasivo de compensación, es decir de un capacitor o de un reactor, la modificación de las constantes ABCD para el modelo de la línea que considera parámetros distribuidos, se trabaja para obtener el circuito equivalente.

Por ejemplo, dada una representación del circuito modal equivalente para la línea de transmisión, obtenido con anterioridad, al incluir un elemento de compensación en paralelo en el extremo receptor, se tiene para la Figura 3.1, las siguientes ecuaciones. De las ecuaciones (2.65).

$$\begin{aligned} V_{so} &= \cosh(\gamma d) V_{ro} + Z_C \sinh(\gamma d) I_{ro} \\ I_{so} &= \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma d) V_{ro} + \cosh(\gamma d) I_{ro} \end{aligned} \quad (3.1)$$

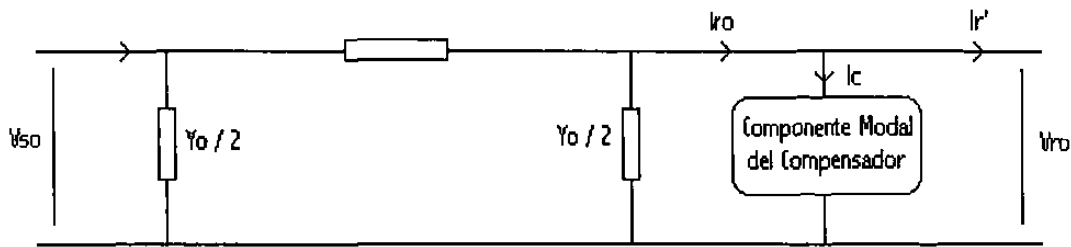


Fig 3.1 Equivalente modal de la línea incluyendo un elemento compensador.

Y dado que:

$$\begin{aligned} I_{ro} &= I_r' + I_C \\ I_C &= \frac{V_{ro}}{Z_{LM}} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Donde Z_{LM} es la impedancia modal equivalente del compensador, entonces:

$$V_{so} = \cosh(\gamma d) V_{ro} + Z_c \sinh(\gamma d) (I_c + I_r')$$

$$V_{so} = \left[\cosh(\gamma d) + \frac{Z_c}{Z_{LM}} \sinh(\gamma d) \right] V_{ro} + Z_c \sinh(\gamma d) I_r' \quad (3.3)$$

$$I_{so} = \left[\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma d) + \frac{1}{Z_{LM}} \cosh(\gamma d) \right] V_{ro} + \cosh(\gamma d) I_r'$$

Se puede encontrar una expresión matricial, como las presentadas anteriormente, para la red de dos puertos:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^c & B^c \\ C^c & D^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R' \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Las constantes ABCD modificadas están dadas por:

$$A^c = \cosh(\gamma d) + \frac{Z_c}{Z_{LM}} \sinh(\gamma d)$$

$$B^c = Z_c \sinh(\gamma d)$$

(3.5)

$$C^c = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma d) + \frac{1}{Z_{LM}} \cosh(\gamma d)$$

$$D^c = \cosh(\gamma d)$$

Tomando en cuenta que antes de incluir el elemento en derivación, se calcularon las constantes ABCD de la línea, entonces las constantes modificadas se pueden expresar en términos de las constantes calculadas anteriormente en (2.66).

$$A^c = A + \frac{B}{Z_{LM}}$$

$$B^c = B$$
(3.6)

$$C^c = C + \frac{D}{Z_{LM}}$$

$$D^c = D$$

También se puede obtener la inversa de la matriz de constantes ABCD modificada para obtener las expresiones de voltaje y de corriente en el extremo de recepción.

$$\begin{bmatrix} A^c & B^c \\ C^c & D^c \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} D^c & -B^c \\ -C^c & A^c \end{bmatrix}$$
(3.7)

Para el caso en que el elemento de compensación entregue una potencia reactiva constante, la modificación se hace directamente sobre las ecuaciones de potencia. De esta forma se modela al elemento como una carga en el extremo receptor.

3.1.1.1 Compensación Capacitiva

En sistemas eléctricos con configuraciones longitudinales o radiales, generalmente las líneas de transmisión de longitud media y larga, tienen dificultad en mantener un buen perfil de voltaje.

Este fenómeno está asociado a la demanda cambiante en el sistema a lo largo de las horas del día y al crecer ésta la magnitud de voltaje en el extremo receptor se reduce, lo que ocasiona un incremento en la corriente. A su vez se tienen mayores pérdidas por el efecto Joule, y un mayor calentamiento el cual puede ser excesivo no solamente en los equipos de la empresa suministradora de energía, sino también en los equipos de los usuarios, los cuales sufren las consecuencias en caso de existir de una mala regulación de voltaje.

Para tratar de mantener un perfil de voltaje adecuado, antes de la compensación, es necesario que el extremo generador envíe potencia reactiva a través de la línea de transmisión, requiriendo una mayor corriente y esto a su vez provoca una mayor caída de tensión. El problema, dependiendo del punto operativo y de las condiciones de la red podría terminar en un colapso de voltaje. La compensación de potencia reactiva capacitiva en paralelo, se refiere esencialmente a la inyección de potencia reactiva en el nodo de recepción de una línea de transmisión, por medio de un banco de capacitores.

De esta manera la potencia reactiva que aporta la fuente no será necesaria y evita el envío a través de la línea de transmisión. Además es importante observar que normalmente la inyección de potencia reactiva en el nodo de recepción es necesaria solamente en condiciones de alta demanda, ya que en el caso de existir una condición de baja demanda puede tenerse un excedente de potencia reactiva. En este último caso se puede tener magnitudes de voltaje que excedan considerablemente al valor nominal y que se tenga una condición peligrosa para el aislamiento del sistema.

3.1.1.2 Compensación Inductiva

En esencia el colocar bancos de reactores o un compensador síncrono subexcitado, tiene la finalidad de cancelar parcial o totalmente el efecto de la susceptancia capacitiva de las líneas de transmisión.

Como se menciono anteriormente, en condiciones de demanda mínima, se puede tener un excedente de potencia reactiva en la red eléctrica, lo cual propiciará altas magnitudes de voltaje en algunos nodos. Este fenómeno ocurre generalmente en líneas de transmisión largas y de alto voltaje, donde el efecto capacitivo de la línea juega un factor importante en la operación del sistema eléctrico.

Al observar el comportamiento de la carga diaria, semanal o en un periodo de tiempo determinado, se tiene que los equipos de compensación no necesariamente deben ser de un valor fijo, es decir que siempre se tendrá una dependencia de las condiciones de operación del sistema. Es decir que para carga máxima o para carga mínima el sistema puede requerir una inyección de potencia reactiva capacitiva o inductiva. Dado los avances tecnológicos, hoy en día es posible pensar en elementos de compensación controlados, con base a dispositivos electrónicos de potencia. En este tipo de dispositivos modernos la dependencia del voltaje en el nodo de recepción, permite conocer si la inyección requerida de potencia reactiva debe ser capacitiva o inductiva.

3.1.2 Compensación Serie

La compensación serie consta de capacitores conectados en serie con la línea de transmisión, y su objetivo es reducir la impedancia serie equivalente de la línea. Se sabe que la reactancia serie es la principal limitante en la máxima transferencia de potencia que puede tenerse en una línea de transmisión. También, cuando es comparada la reactancia serie con la magnitud de la resistencia de los conductores, se tiene que es la razón principal para la caída de tensión en la línea de transmisión.

Para la compensación serie los parámetros importantes, en lugar del valor de potencia como se hace en la compensación en paralelo para los bancos de capacitores o reactores, se da por medio de un porcentaje de la reactancia inductiva serie que se desea compensar.

De esta manera, dado el análisis modal de la línea de transmisión y una vez obtenidas las impedancias y las admitancias modales, se puede modificar las impedancias modales por un factor K .

$$K = 1 - \frac{\% \text{ de comp.}}{100} \quad (3.8)$$

Con el factor K se considera el efecto neto de la compensación serie, cuyo objetivo es el reducir la impedancia serie de la línea con la finalidad de aumentar la característica de transferencia de potencia. Así, se modifican los valores de la impedancia característica de la línea y de la constante de propagación, lo cual da origen a nuevas constantes ABCD para la línea de transmisión compensada.

El procedimiento para el análisis de los flujos de potencia es similar al aplicado, cuando se trata de resolver las ecuaciones no lineales de potencia, en función de las constantes ABCD de la línea de transmisión. En este caso la línea se representa como una red de dos puertos y su solución se obtiene a través del método iterativo de Newton-Rapshon.

La compensación serie de las líneas de transmisión, tiene un gran impacto en la transferencia de potencia.

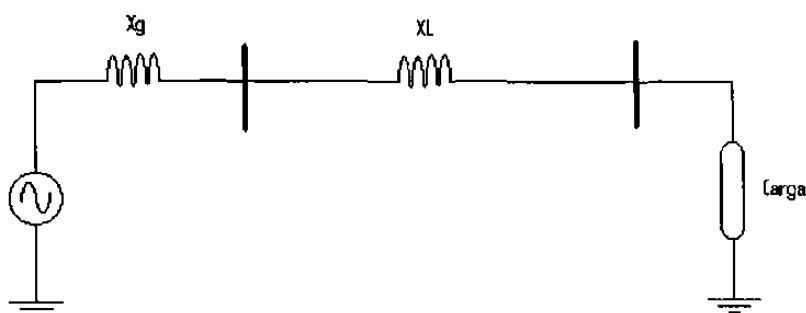


Fig. 3.2 Circuito radial equivalente.

Para llevar a cabo una compensación serie, se hace el cálculo de la reactancia serie de la línea y se decide el porcentaje de la compensación serie que se desea para obtener las características deseadas de transferencia de potencia, con base a diferentes estudios de estabilidad transitoria, transitorios electromagnéticos para observar el impacto del capacitor serie en las frecuencias de resonancia del sistema, etc.

Para el circuito de la Figura 3.2 la inductancia serie equivalente de la línea está dada por (3.9) y se puede determinar el valor que deberá tener el capacitor serie para compensar la reactancia inductiva de la línea, de modo que la nueva reactancia serie de la línea será expresada por (3.10).

De esta manera la reactancia serie equivalente será menor que en el caso sin compensación. El circuito equivalente resulta como en la Figura 3.3.

$$X_s = X_g + X_L \quad (3.9)$$

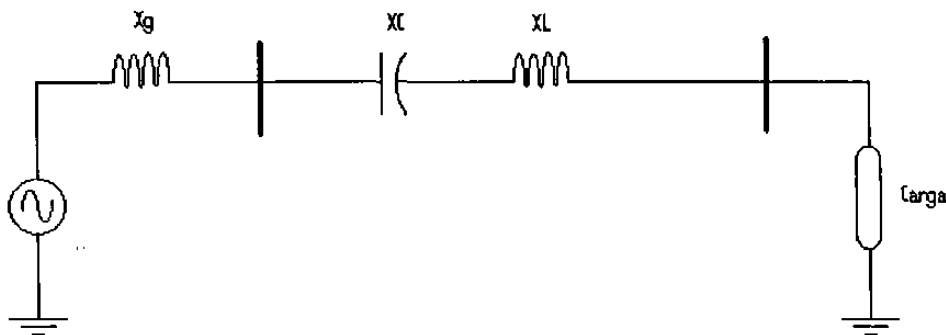


Fig. 3.3 Circuito equivalente con compensación serie.

$$X_s = X_g + X_L - X_C \quad (3.10)$$

3.2 Efectos en la Estabilidad del Sistema

Para analizar el comportamiento de las líneas de transmisión y el efecto de los diferentes tipos de compensación, se considera para la discusión el circuito de la Figura 3.4.

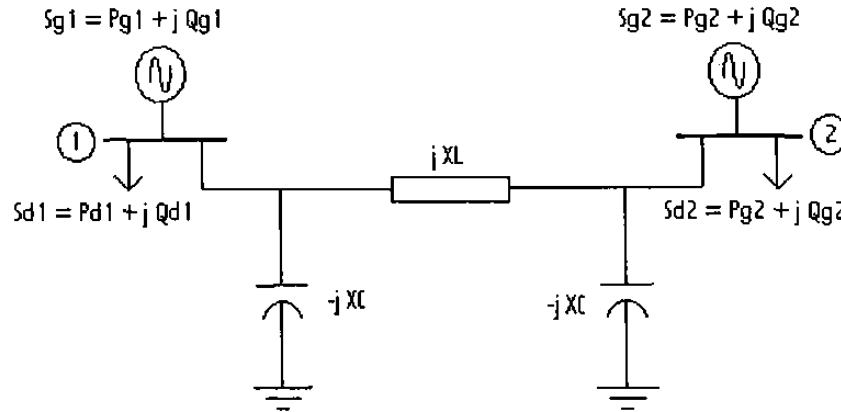


Fig. 3.4 Circuito equivalente, caso de línea sin pérdidas.

La potencia transmitida por la línea del nodo 1 al nodo 2, es:

$$S_1 = S_{g1} - S_{d1} = (P_{g1} - P_{d1}) + j(Q_{g1} - Q_{d1}) = S_{12} \quad (3.11)$$

Con suma de corrientes en el nodo 1, se tiene:

$$I_{12} = \frac{S_1^*}{V_1^*} = \frac{V_1}{-jX_C} + \frac{V_1 - V_2}{jX_L} \quad (3.12)$$

Al despejar la potencia, de la ecuación anterior, se tiene:

$$S_1^* = P_1 - j Q_1 = j \frac{|V_1|^2}{X_C} - j \frac{|V_1|^2}{X_L} + j \frac{|V_1||V_2|}{X_L} \angle(\delta_2 - \delta_1) \quad (3.13)$$

$$\delta_{21} = \delta_2 - \delta_1$$

al separar las expresiones para la potencia real y para la potencia reactiva:

$$P_1 = \frac{|V_1||V_2|}{X_L} \cos(\delta_{21} + 90^\circ) = -\frac{|V_1||V_2|}{X_L} \text{sen}(\delta_{21}) = \frac{|V_1||V_2|}{X_L} \text{sen}(\delta_{12}) \quad (3.14)$$

$$-j Q_1 = j \frac{|V_1|^2}{X_C} - j \frac{|V_1|^2}{X_L} + j \frac{|V_1||V_2|}{X_L} \cos(\delta_2 - \delta_1)$$

En las ecuaciones obtenidas para la transferencia de potencia (3.14) se observaron tres elementos como los más importantes para establecer el flujo de potencia real en una línea de transmisión, las magnitudes de los voltajes en los extremos de envío y recepción, la reactancia serie de la línea de transmisión y la diferencia angular entre los voltajes nodales en los extremos de la línea.

Al despreciar las pérdidas en la ecuación de potencia real, se observa cómo la máxima potencia que se transmite en estado estable se tiene cuando existe una diferencia angular entre voltajes nodales de 90° .

La máxima potencia depende de la reactancia serie y las magnitudes de los voltajes en los extremos de envío y recepción. Estos son dos aspectos en los que se puede concentrar el estudio para mejorar las características de transferencia de potencia. La impedancia serie se reduce con la topología de una red más mallada, que es el resultado de la construcción de líneas o el uso de haces de conductores; estrategias que son frecuentemente utilizadas con este fin.

Los tipos de conductores resultan de gran importancia, considerando el material con que se construye, el calibre del conductor y la estructura del mismo. Estas características se estudiaron en el Capítulo 2 para conductores trenzados, pero otra manera de reducir la reactancia serie es mediante la compensación serie.

Por otra parte, para mantener las magnitudes de los voltajes nodales es necesario contar con un buen soporte de potencia reactiva en los nodos donde se desea controlar la magnitud del voltaje. Este objetivo se logra mediante una compensación en paralelo de la línea de transmisión; la compensación en paralelo para soporte de voltaje y como aportación de potencia reactiva al sistema se refiere, normalmente, a la conexión de bancos de capacitores en paralelo. En cambio la conexión de reactores es adecuada cuando se tienen problemas de sobrevoltajes y de transitorios por maniobra en líneas de transmisión, que de no drenarse a tierra la energía asociada, puede dañar los aislamientos. Los transitorios son el resultado de diferentes fenómenos que se presentan en una línea de transmisión al tener maniobras de switcheo, energización y desenergización.

Además de lo descrito en el párrafo anterior, se puede observar que el control de voltaje, resulta ser un problema dinámico, debido a la dependencia de las condiciones de operación del sistema eléctrico. Los cambios en la demanda no se dan súbitamente, aun así se requiere de un control adecuado para determinar el tipo y la magnitud de la inyección de potencia reactiva al nodo.

Para observar el efecto de los diferentes tipos de compensación, capacitiva paralelo y compensación en serie, se puede observar la Figura 3.5, que se toma como caso base. La compensación inductiva en paralelo, como ya se comentó, cumple con otros objetivos, los cuales son diferentes al mejoramiento de la estabilidad del sistema eléctrico. En la Figura 3.5, se muestra la importancia de tener la compensación de líneas de transmisión, lo cual ha dado lugar recientemente a un creciente interés por hacer más robustos a los sistemas eléctricos y se dedica más esfuerzo para investigaciones en esta dirección.

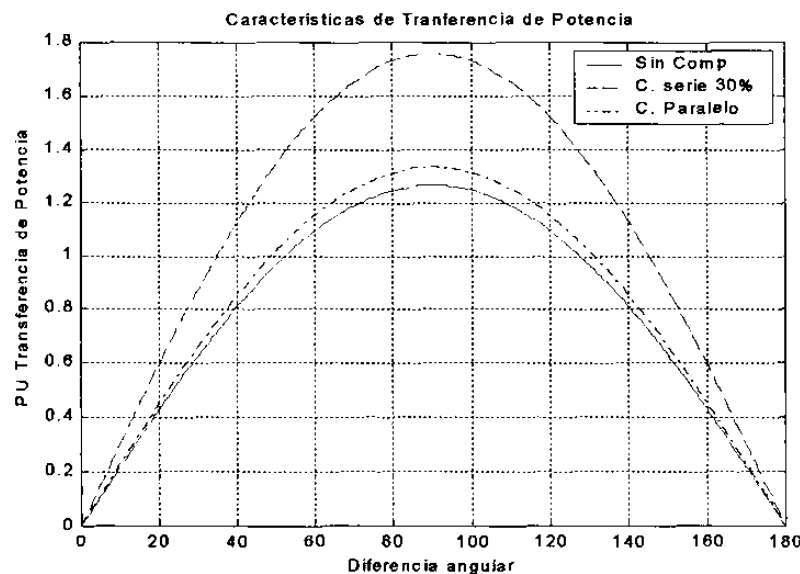


Fig. 3.5 Características de transferencia de potencia.

Recientemente se han propuesto modelos para sistemas de transmisión flexibles en corriente alterna (FACTS), los cuales han generado un gran campo de estudio con el objetivo de tener un mejor control sobre los tres parámetros importantes para el control de la máxima transferencia de potencia de una línea de transmisión.

Los factores son: la impedancia serie de la línea, las magnitudes de voltaje en los nodos extremos y la separación angular entre máquinas equivalentes en ambos extremos de la línea de transmisión analizada.

Además, en estudios de estabilidad transitoria, la característica de la línea compensada representa un coeficiente de sincronización mayor, respecto al caso sin compensación. El coeficiente de sincronización K_s , se define como la pendiente en el punto de operación de la curva de transferencia de potencia, y se expresa por medio de (3.15).

$$K_s = \frac{\Delta P_e}{\Delta \delta} \quad (3.15)$$

El coeficiente de sincronización representa el cambio en la potencia eléctrica respecto al cambio de ángulo nodal. Así, ante una falla, un sistema robusto tiene una mayor capacidad de soportar un disturbio antes de la liberación de falla y que la máquina que representa esa porción del sistema continua en sincronismo con el resto del sistema. Además es importante notar cómo el coeficiente de sincronización cambia con la condición operativa del sistema, de modo que en la condición de operación de potencia máxima el coeficiente de sincronización es cero, y para valores del ángulo mayor de 90° presenta valores negativos.

3.3 Control del Perfil de Voltaje

Con las herramientas desarrolladas en este capítulo como son los diferentes tipos de compensación que se pueden aplicar a una línea de transmisión, se tiene las bases para poder llevar a cabo, dependiendo de las condiciones de operación del sistema eléctrico, un buen control del perfil de voltaje. La Figura 3.6 muestra el comportamiento del perfil de voltaje al pasar de una condición de operación con carga mínima hasta una condición con carga máxima. La línea de transmisión tiene las características que son típicas de 400 KV, ver Apéndice A. Se considera el caso balanceado y que la línea tiene un diagrama unifilar como se muestra en la Figura 3.2.

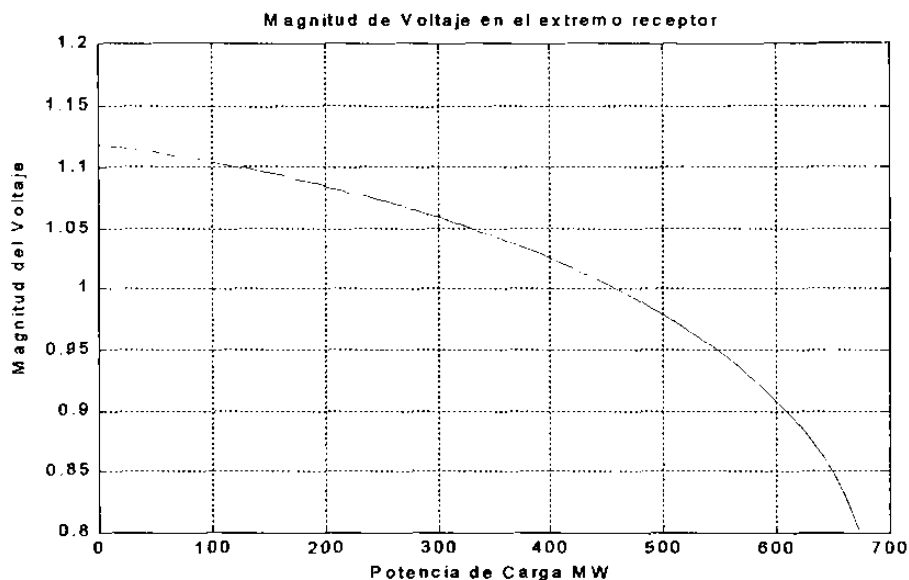


Fig. 3.6 Perfil de Voltaje, caso base.

En la Figura 3.6 se puede observar que para condiciones de operación de demanda mínima, el voltaje en el extremo de recepción estará por encima de 1 p.u. Lo cual indica que se tiene exceso de potencia reactiva en la red, esta potencia se tendrá que absorber por un elemento generador en el extremo de envío. En el caso de demanda máxima se observa cómo la falta de potencia reactiva degrada el voltaje en el nodo de recepción y cómo se incrementan las pérdidas, debido al incremento en la corriente para satisfacer la demanda con un voltaje deprimido.

Si se instala un banco de capacitores en el extremo de recepción se puede observar que en condiciones de demanda mínima el sobrevoltaje sería mayor, pero en condiciones de demanda máxima no se tendría una magnitud de voltaje tan crítica. Si en vez de un banco de capacitores se instala un banco de reactores, se tendrá un comportamiento opuesto. Si se tiene una compensación serie, el perfil de voltaje tendrá una característica más plana. Las características se muestran en la Figura 3.7, incluyendo el caso base.

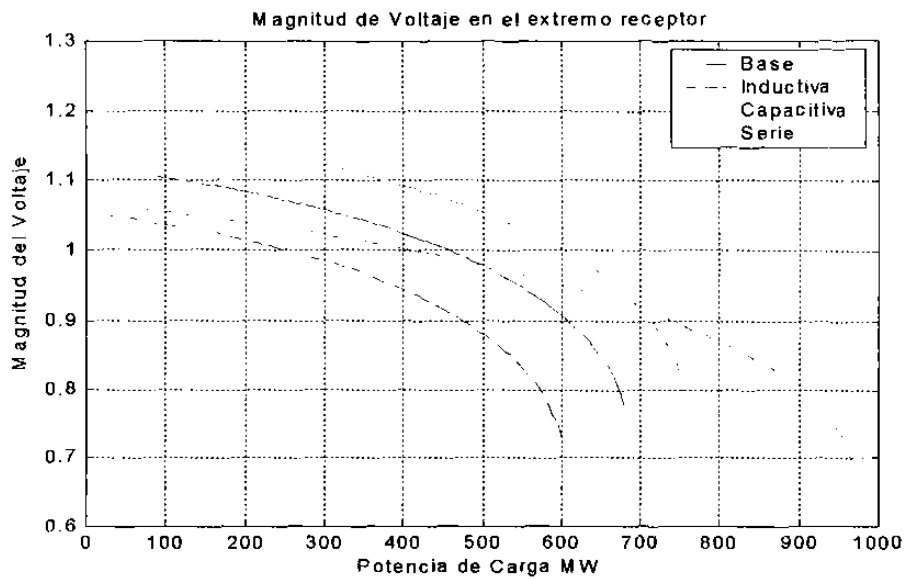


Fig. 3.7 Perfiles de voltaje ante diferentes tipos de compensación, caso balanceado.

En el ejemplo ilustrativo se usó un banco de capacitores conectados en estrella de 90 MVARs y un banco de reactores conectados en estrella de 90 MVARs. En el caso de la compensación serie se compenso en un 40 % de la impedancia serie de la línea.

3.4 Efecto de Compensación en Líneas Desbalanceadas

Con el procedimiento de compensación anterior, pero aplicado a líneas desbalanceadas y usando los conceptos del análisis modal, los elementos de compensación son llevados al dominio modal.

Con este procedimiento se resuelven tres circuitos equivalentes por separado, como se muestra en el circuito equivalente de la Figura 3.1. Se lleva a cabo un análisis de manera similar al análisis del caso balanceado, pero ahora se obtienen curvas para cada fase y se observa el comportamiento, según el tipo de compensación.

Los resultados se muestran en la Figura 3.8.

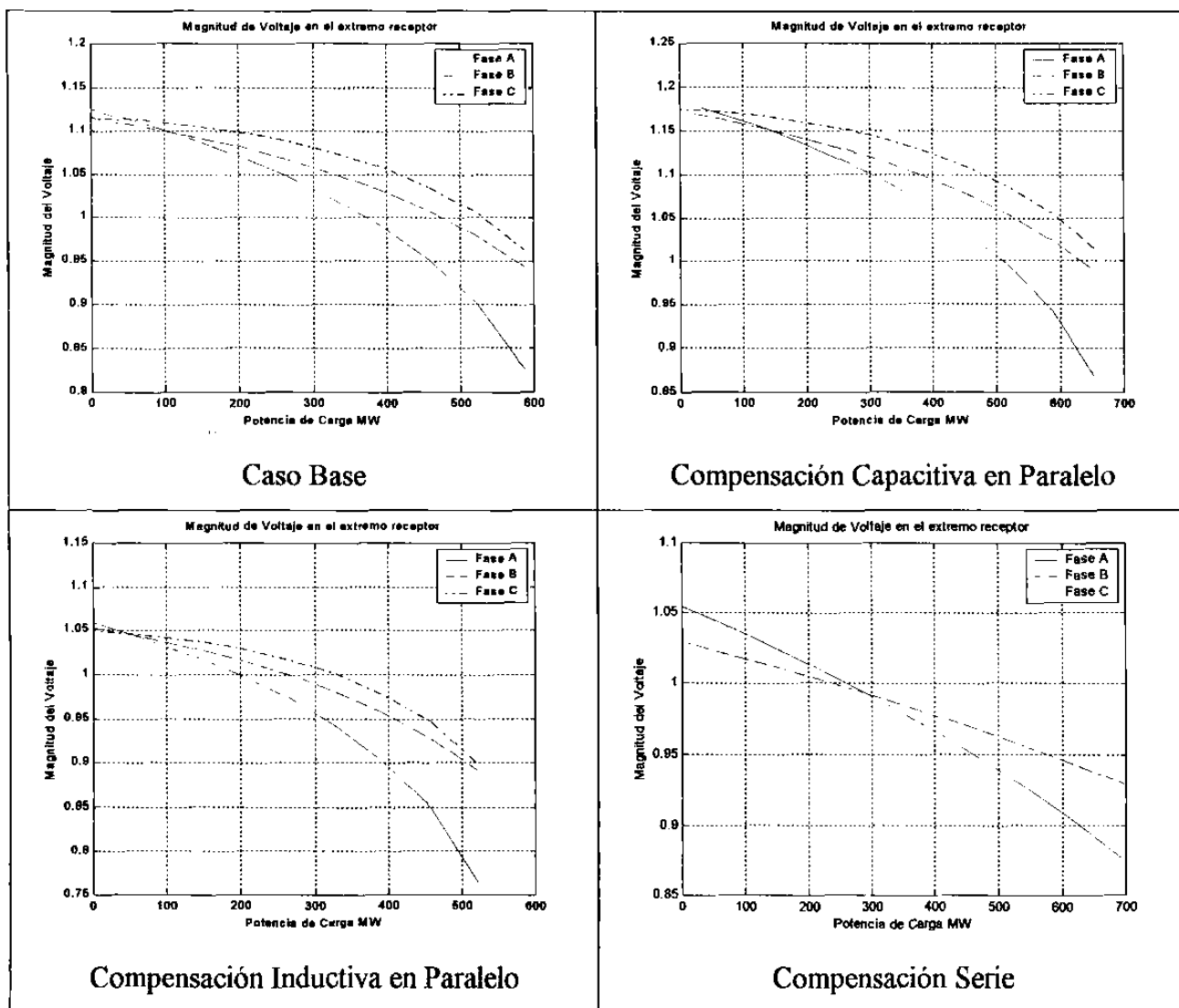


Fig. 3.8 Perfiles de voltaje con diferentes tipos de compensación, caso desbalanceado.

3.5 Observaciones

Con el tipo de estudios presentados en este capítulo se puede analizar los efectos de cada tipo de compensación por separado, se puede determinar y llevar a cabo combinaciones de esquemas de compensación de manera que se tenga una característica adecuada para el perfil de voltaje. Esto quiere decir, que se mantenga una magnitud de voltaje lo más cercana al valor nominal y con el objetivo de cuidar el desbalance dentro de lo establecido por normas de calidad de la energía y los requerimientos de los usuarios.

Es importante conocer el punto de operación del sistema eléctrico, ya que con dependencia del punto de operación del sistema, los requerimientos de compensación pueden modificarse para la línea de transmisión en estudio.

Como parte importante del capítulo se comprobó el efecto que deben tener los elementos de compensación en el sistema de transmisión en el importante caso de sistema desbalanceado.

En la Figura 3.8 puede observarse que en todos los casos analizados la fase que sufre una mayor caída de tensión es la fase a , la estructura utilizada para los estudios es una estructura tipo A donde los conductores de los extremos tienen las mismas características en cuanto a la altura y efectos del resto de los conductores de la torre de transmisión, a esos dos conductores se les ha nombrado como fase a y fase b , sin embargo el hecho de que la fase a se vea afectada en mayor medida por la caída de tensión se debe a que la contribución de los conductores en el modo de propagación *fase-fase* (ver la Figura 2.10) es en sentido opuesto y puede determinarse que la contribución del voltaje modal de este modo de propagación al voltaje de las fases, afecta más al voltaje de la fase a como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Contribución de los modos de propagación a los voltajes de las fases

	Fase a	Fase b	Fase c
Modo 1 <i>Homopolar</i>	$0.0698 \angle 37.08^\circ$	$0.0694 \angle 39^\circ$	$0.0698 \angle 37.08^\circ$
Modo 2 <i>Fase-Fase</i>	$0.7962 \angle -57.6^\circ$	0	$0.7962 \angle 122.4^\circ$
Modo 3 <i>Interfase</i>	$0.4214 \angle 41.20^\circ$	$1.035 \angle -142.75^\circ$	$0.4214 \angle 41.20^\circ$

Si se considera una referencia de voltajes de fase como en (3.16):

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \angle 0^\circ \\
 V_b &= 1 \angle 120^\circ \\
 V_c &= 1 \angle 240^\circ
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

De la Tabla 3.1 y considerando la referencia de la ecuación (3.16), puede observarse el modo de propagación que tiene un mayor impacto con su contribución en los voltajes de las fases en el nodo de recepción es el modo *fase-fase* y la diferencia en el ángulo entre la contribución a la fase a con respecto a la referencia de V_a en (3.16), es de -57° aproximadamente y tiene un mayor impacto que en el caso de la fase c donde la diferencia angular esta más cercana a 90° y su proyección sobre la referencia de V_c es menor.

La Figura 3.9 muestra la suma fasorial de las contribuciones y se puede notar que el impacto que tiene en la magnitud de la fase a es mayor que en la fase c , esa es la razón por la cual en las figuras mostradas en este capítulo la fase a tiene una mayor caída de tensión en cualquier caso de los analizados en este capítulo.

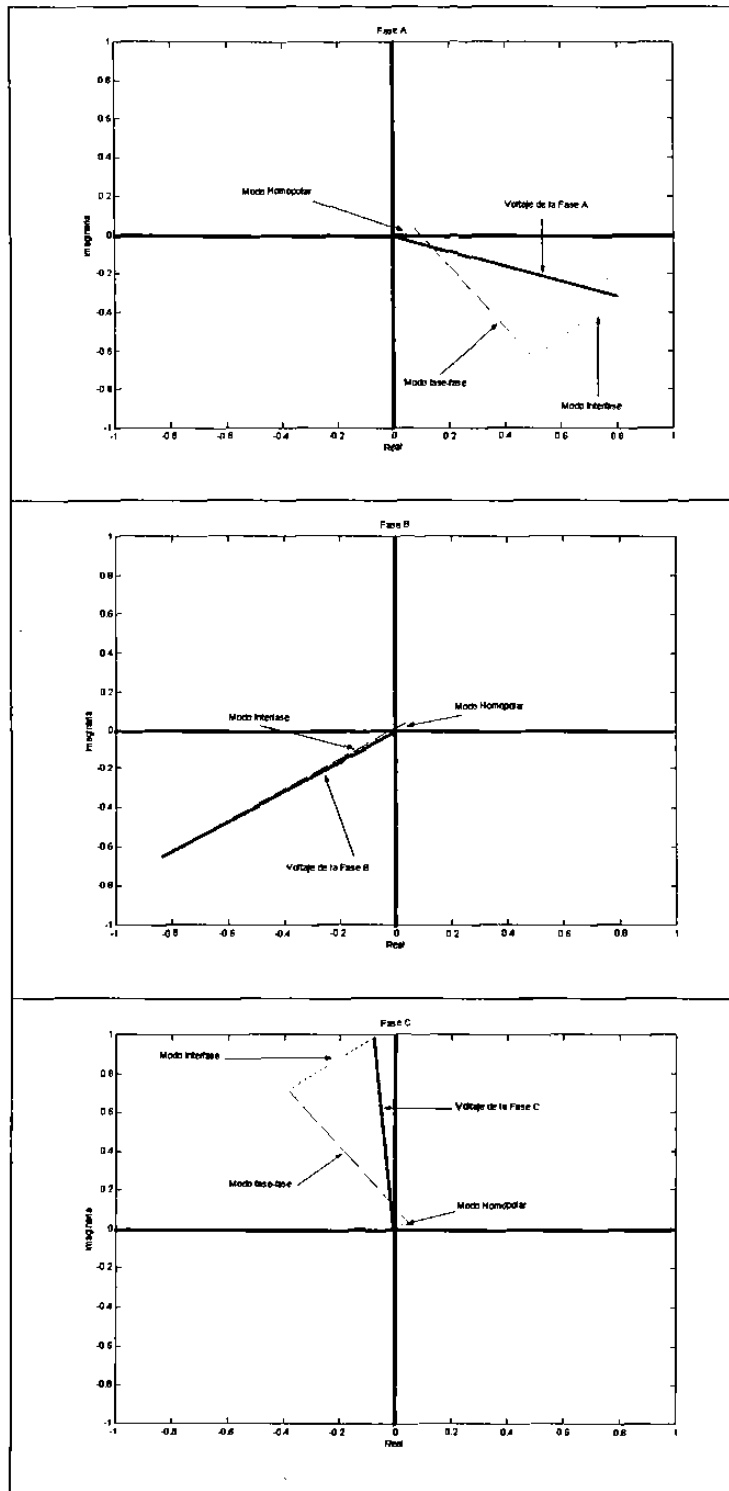


Fig. 3.9

Diagramas fasoriales de las contribuciones modales a los voltajes de las fases

CAPITULO 4

ANALISIS GENERALIZADO DE CARGABILIDAD EN LINEAS DE TRANSMISION

4.1 Límites de Cargabilidad y Factores de Sensitividad

En la operación de los sistemas eléctricos es importante conocer la capacidad de los equipos que se tiene instalados. En el caso de las líneas de transmisión esto es más importante ya que la capacidad varia de acuerdo a la condición operativa. Los operadores de los sistemas eléctricos deben conocer con la mayor exactitud posible los recursos de transmisión con que cuentan, esto permite tomar decisiones más acertadas sobre la redistribución de flujos de potencia y medidas operativas adecuadas.

Por ejemplo, cuando ocurre una falla en alguna línea de transmisión, si las protecciones operan correctamente y la línea sale de operación la redistribución de los flujos de potencia puede llevar a rebasar los límites de otra u otras líneas del sistema y provocar que también operen sus protecciones. Una nueva redistribución de flujos provocaría seguramente en alguna otra línea del sistema problemas similares y así sucesivamente hasta llegar a una desarticulación del sistema.

El escenario descrito requiere establecer límites de cargabilidad para las principales líneas de transmisión del sistema. Es común en la literatura técnica encontrar tres límites que restringen la cargabilidad de un enlace, sin embargo el determinar estos límites convencionales no explica cabalmente el nivel de operación de las líneas; debido a factores como desbalances de las líneas de transmisión. Este punto se extiende e ilustra más adelante.

4.1.1 Límite Térmico

Este límite es determinado por las características mecánicas y eléctricas de los conductores. Al respetarse este límite se conserva la vida útil del elemento conductor, su determinación se basa en la corriente máxima que puede circular a través del conductor sin que el calentamiento producido por efecto Joule altere las características mecánicas y eléctricas. Para determinar este límite en líneas aéreas es importante tomar en cuenta los factores atmosféricos y del medio ambiente, los que pueden incrementar o reducir la capacidad de disipación de calor del conductor.

Se observa que este límite difícilmente es rebasado en sistemas eléctricos débiles, en este tipo de sistemas es más frecuente encontrar como una limitación otros factores de operación y de seguridad del sistema. En redes eléctricas robustas se puede llegar a rebasar el límite térmico en el caso de líneas de corta longitud, debido a que el límite de caída de tensión permisible no se excede; lo mismo puede decirse del límite por estabilidad o separación angular, siendo la separación angular relativamente pequeña. Este margen térmico se establece en función del tipo de conductor.

Los fabricantes de conductores en dependencia del naturaleza y calidad de los materiales que utilizan para desarrollar sus productos, determinan un máximo valor de corriente que deberá fluir a través de su conductor, esto debido a que la circulación de corriente excesiva provoca mayores pérdidas en el conductor, estas pérdidas de energía se reflejan en calor que provoca un incremento en el gradiente de temperatura en la superficie del conductor y a su vez se incrementa la resistencia, lo que puede generar altas temperaturas en los conductores y provocar deformaciones en los materiales o pérdidas de las características de conductividad de los materiales de que están contruidos los conductores.

Una de las compañías importantes suministradoras de energía eléctrica en México, tiene sus propios niveles de seguridad para operar y exige a los fabricantes una cierta densidad de corriente por unidad de área en los conductores, siendo estos responsables de asegurar que cumpla con esas características considerando diversos factores ambientales, tales como: nivel sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, velocidad del viento, agentes contaminantes, etc. En tableros de distribución por ejemplo se exige una densidad de corriente de 800 amperes por pulgada cuadrada.

4.1.2 Límite por Caída de Tensión

Este índice se relaciona con el servicio a los usuarios, ya que se debe mantener la magnitud de voltaje en los extremos de envío y de recepción, dentro de una banda de valores respecto al voltaje nominal de operación. Con bajo voltaje se incrementa la corriente para suministrar un valor dado de demanda y como consecuencia se aumenta las pérdidas de transmisión y el calentamiento de los equipos que componen el sistema eléctrico. En este caso puede incluso llegarse al límite térmico de la línea de transmisión. Generalmente como criterio de planeación se establece una caída máxima de tensión del 5 % entre terminales de envío y recepción de la línea de transmisión.

4.1.3 Límite de Estabilidad

Como se mencionó en el capítulo anterior, al tratar sobre los efectos de la compensación en la estabilidad del sistema eléctrico, se debe mantener un margen de estabilidad que asegure un coeficiente de sincronización positivo, lo suficientemente grande como para conservar la estabilidad del sistema ante disturbios.

Este límite se establece permitiendo que por la línea de transmisión se envíe como máximo una potencia igual al 70 % (este porcentaje puede variar en función del grado de seguridad del sistema), de la potencia máxima [2, 19 y 20], así la ecuación de flujo de potencia está dada por la expresión (4.1).

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{E_s E_r}{X_{eq}} \text{sen}(\delta_{sr}) \quad (4.1)$$

el margen de estabilidad queda expresado por:

$$ME\% = \frac{P_{m\acute{a}x} - 0.7 P_{m\acute{a}x}}{P_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (4.2)$$

Entonces, dado que la potencia de operación no debe rebasar el 70 % de la máxima transferencia de potencia, el ángulo entre máquinas equivalentes no debe excederse del valor calculado por (4.3), el ejemplo del margen de 70 % es comúnmente utilizado en los sistemas eléctricos.

$$\delta_{sr} = \text{arc sin} \left(1 - \frac{ME\%}{100} \right) \quad (4.3)$$

Un margen de estabilidad del 70 % limita la transferencia de potencia con una separación angular entre máquinas equivalentes, de 44° aproximadamente.

4.2 Modelo para Análisis de Cargabilidad

El modelo del sistema para el análisis de la cargabilidad, es el que se muestra en la Figura 4.1 y normalmente representa a un sistema balanceado.

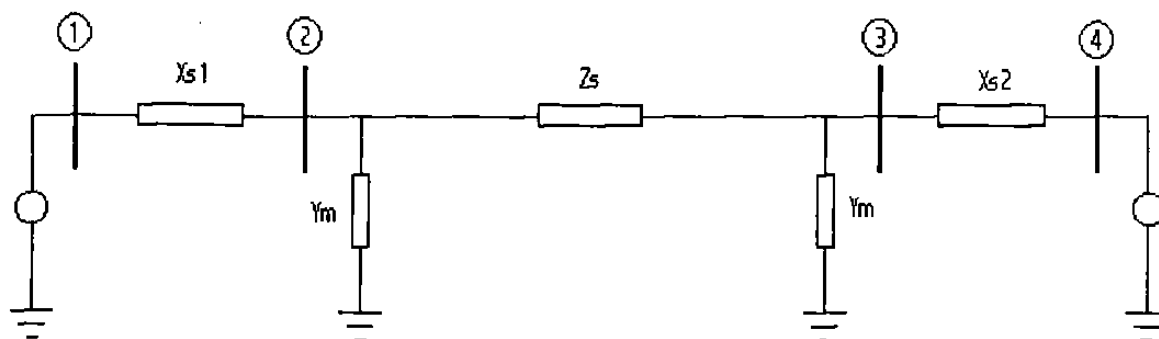


Fig. 4.1 Modelo de línea para análisis de cargabilidad.

X_{s1} y X_{s2} , representan las capacidades de cortocircuito de cada uno de los sistemas a interconectar por medio del enlace. Se supone que ambos sistemas operan eléctricamente en forma independiente antes de colocar la línea de transmisión.

La solución de flujos de potencia para un problema modificado, es decir diferente a la solución de flujos de potencia convencional, se obtiene para una serie de incrementos en la potencia de envío, hasta que se viola alguno de los límites; ya sea el de caída de voltaje o el térmico, lo cual determinará la capacidad de potencia máxima a transmitir sobre la línea. Generalmente en el estudio no se incluye la comprobación del límite térmico debido a que este tiene una gran dependencia del tipo de conductor, además de que en el estudio se está considerando líneas largas y en este tipo de líneas el límite térmico difícilmente es rebasado.

Por medio de la solución de flujos, se obtiene las magnitudes de voltajes en los cuatro nodos, sin embargo, se supone que mediante la aplicación de controles en las máquinas equivalentes el voltaje en la terminal de envío puede ser de 1 p.u. Para lograr este efecto se tendrá que incrementar el voltaje controlado del nodo generador 1, ya que el nodo 2 es considerado como barra compensadora. El incremento en la magnitud que se requiere para mantener en 1 p.u. el voltaje de envío, se calcula mediante factores de sensibilidad [19], procedimiento que se describirá enseguida.

4.3 Factores de Sensibilidad

En general se resuelve el sistema en condiciones desbalanceadas, siendo el análisis de éste problema uno de los principales objetivos de esta tesis, de modo que el análisis se hace en el dominio modal para resolver tres sistemas equivalentes modales, que resultan más sencillos de resolver que una red trifásica con elementos totalmente acoplados. Se considera aplicable una formulación de flujos desacoplado rápido, expresado por (4.4).

$$\begin{bmatrix} B_{11}^{M1} & B_{12}^{M1} & 0 \\ B_{21}^{M1} & B_{22}^{M1} & B_{23}^{M1} \\ 0 & B_{32}^{M1} & B_{33}^{M1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1^{M1} \\ \Delta V_2^{M1} \\ \Delta V_3^{M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1^{M1} \\ \Delta Q_2^{M1} \\ \Delta Q_3^{M1} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Una vez obtenida la solución de flujos se puede determinar el valor del incremento en voltajes del nodo 2, ΔV_2 en las fases *abc*, y llevarlo nuevamente al dominio modal, de modo que si se observa la expresión (4.4), se tiene que la única inyección de potencia reactiva diferente de cero es la correspondiente al nodo de voltaje controlado. Este es el nodo al cual se requiere incrementar la magnitud de voltaje para obtener 1.0 p. u. en el nodo 2.

Con las condiciones nodales (4.4) se convierte en (4.5).

$$\begin{bmatrix} B_{11}^{M1} & B_{12}^{M1} & 0 \\ B_{21}^{M1} & B_{22}^{M1} & B_{23}^{M1} \\ 0 & B_{32}^{M1} & B_{33}^{M1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1^{M1} \\ \Delta V_2^{M1} \\ \Delta V_3^{M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1^{M1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Al arreglar (4.5), de manera que se tenga a todas las incógnitas del mismo lado y despejando la última ecuación, como lo muestra (4.6).

$$B_{32}^{M1} \Delta V_2^{M1} + B_{33}^{M1} \Delta V_3^{M1} = 0 \quad (4.6)$$

$$\Delta V_3^{M1} = -\frac{B_{32}^{M1} \Delta V_2^{M1}}{B_{33}^{M1}}$$

Reordenando la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} B_{11}^{M1} & B_{12}^{M1} & 0 \\ B_{21}^{M1} & B_{22}^{M1} - \frac{B_{32}^{M1} B_{23}^{M1}}{B_{33}^{M1}} & 0 \\ 0 & -\frac{B_{32}^{M1}}{B_{33}^{M1}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1^{M1} \\ \Delta V_2^{M1} \\ \Delta V_3^{M1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1^{M1} \\ 0 \\ \Delta V_3^{M1} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

En la ecuación (4.7) se conoce ΔV_2^{M1} , que es el incremento necesario para que el voltaje del nodo 2 permanezca en 1.0 p.u., sin olvidar que debe resolverse el problema en el dominio modal.

Del segundo renglón de (4.7) se puede sustituir y obtener ΔV_1^{M1} y con todos los incrementos de los voltajes nodales conocidos se calcula el incremento necesario de potencia reactiva en el nodo 1. Con el incremento de potencia reactiva ΔQ_1 , en la siguiente solución de flujos de potencia se obtiene una mejor aproximación de V_2 a 1.0 p.u..

El proceso iterativo se repite hasta que se cumple con una tolerancia preestablecida y cuando el valor de la magnitud del voltaje en el nodo 2 sea cercana a 1.0 p.u.

Entonces se tiene:

$$\Delta V_1^{M1} = - \frac{\left[B_{22}^{M1} - \frac{B_{23}^{M1} B_{32}^{M1}}{B_{33}^{M1}} \right]}{B_{21}^{M1}} \Delta V_2^{M1} \quad (4.8)$$

El término que multiplica a ΔV_2^{M1} representa un factor de sensibilidad. Este factor es usado para calcular la corrección requerida al voltaje ΔV_1 , es decir ΔV_1^{M1} para mantener el voltaje V_2^{M1} en un valor tal que al transformarse al dominio *abc* se mantenga en 1.0 p.u.

El cálculo de los coeficientes y las correcciones puede efectuarse en cada iteración, sin necesidad de obtener una solución para corregir y resolver nuevamente el problema de flujos de cargas.

4.4 Curvas de Potencia Normalizadas al SIL para la Línea de Transmisión

4.4.1 Análisis de la Línea sin pérdidas

Si se considera una línea de transmisión sin pérdidas con ecuaciones como (2.62), escritas como (4.9), y dado que la potencia de envío se calcula en función de las constantes ABCD de la línea de transmisión, entonces con (4.10) se determina la potencia compleja S_s .

$$V_s = V_R \cosh(j \beta d) + I_R Z_C \cosh(j \beta d) \quad (4.9)$$

$$I_s = I_R \cosh(j \beta d) + \frac{V_R}{Z_C} \cosh(j \beta d)$$

$$S_s = V_s I_s^* = V_s \left(C V_R + \frac{D}{B} V_s - \frac{D A}{B} V_R \right)^* = V_s \left(\frac{D}{B} V_s - \frac{1}{B} V_R \right)^* \quad (4.10)$$

Separando las expresiones para potencia activa y potencia reactiva:

$$P_s = \frac{|V_s|^2 |D|}{|B|} \cos(\theta_B - \theta_D) - \frac{|V_s| |V_R|}{|B|} \cos(\delta_s - \delta_R + \theta_B) \quad (4.11)$$

$$Q_s = \frac{|V_s|^2 |D|}{|B|} \sin(\theta_B - \theta_D) - \frac{|V_s| |V_R|}{|B|} \sin(\delta_s - \delta_R + \theta_B)$$

Dado que la línea es considerada sin pérdidas, es decir:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad y \quad \gamma = j\omega l \sqrt{LC} = j\beta l \quad (4.12)$$

De la Tabla 4.1, obtenida por las propiedades de las funciones hiperbólicas, se tiene las constantes ABCD para cada modo de propagación:

Tabla 4.1 Propiedades de las funciones hiperbólicas.

$A_i = \cosh(j\beta_i d)$	$A_i = \cos(\beta_i d)$
$B_i = Z_{c_i} \sinh(j\beta_i d)$	$B = jZ_{c_i} \sen(\beta_i d)$
$C_i = \frac{1}{Z_{c_i}} \sinh(j\beta_i d)$	$C = j\frac{1}{Z_{c_i}} \sen(\beta_i d)$
$D_i = \cosh(j\beta_i d)$	$D_i = \cos(\beta_i d)$

Como Z_c es una cantidad puramente real, y generalmente el voltaje de recepción y de envío se relacionan a través de un factor M , como: $V_S = M V_R$, la expresión (4.11) se reduce a la forma (4.13), [20 y 22].

$$P_s = -\frac{|V_s||V_R|}{|B|} \cos(\delta_s - \delta_R + \theta_B) = \frac{M|V_R|^2}{|B|} \text{sen}(\delta_s - \delta_R) \quad (4.13)$$

$$Q_s = \frac{|V_s|^2|D|}{|B|} - \frac{M|V_R|^2}{|B|} \cos(\delta_s - \delta_R)$$

Usando los resultados de la Tabla 4.1, y usando la definición de la potencia natural de la línea de transmisión, SIL dada por (4.14), se obtiene expresiones de potencia activa y de potencia reactiva de envío, pero normalizadas al SIL de la línea de transmisión.

El desarrollo presentado es similar a la referencia [20].

$$SIL \approx \frac{|V_R|^2}{Z_c} \quad (4.14)$$

$$\frac{P_s}{SIL} = \frac{M}{\text{sen}(\beta d)} \text{sen}(\delta_s - \delta_R) \quad (4.15)$$

$$\frac{Q_s}{SIL} = \frac{M}{\text{sen}(\beta d)} [|D| - \cos(\delta_s - \delta_R)]$$

De modo que las Figuras 4.2 muestran las curvas obtenidas para el caso de estudio de una línea de transmisión con un diagrama unifilar semejante al de la Figura 3.2, con las características mostradas en el Apéndice A, para el caso balanceado o desbalanceado.

En estas gráficas puede notarse claramente que cuando por la línea de transmisión existe un flujo de potencia igual a 1.0 p.u. del SIL, la potencia reactiva requerida por la línea de transmisión es cero, es decir los efectos inductivo y capacitivos de la línea de transmisión se cancelan entre sí, de manera que bajo esta condición operativa la línea de transmisión, vista desde sus terminales, no aporta ni requiere potencia reactiva del sistema.

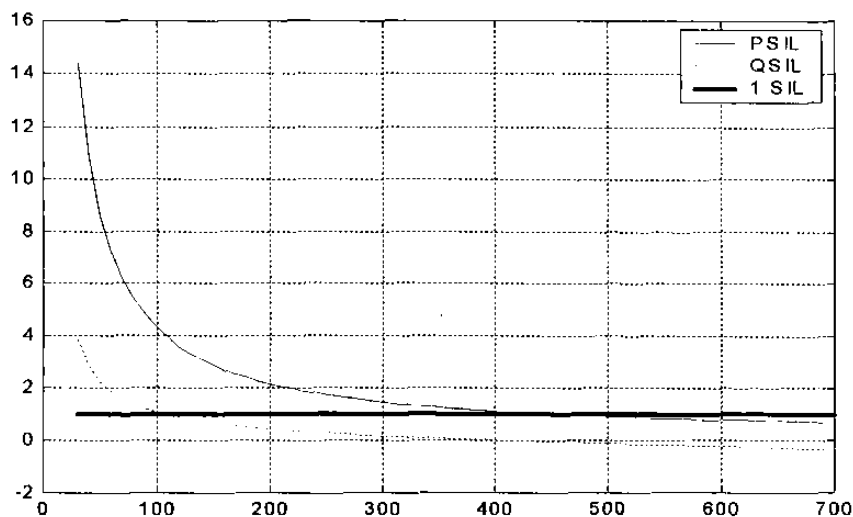


Fig. 4.2.a Curvas de transferencia de potencia normalizadas al SIL, línea balanceada sin pérdidas.

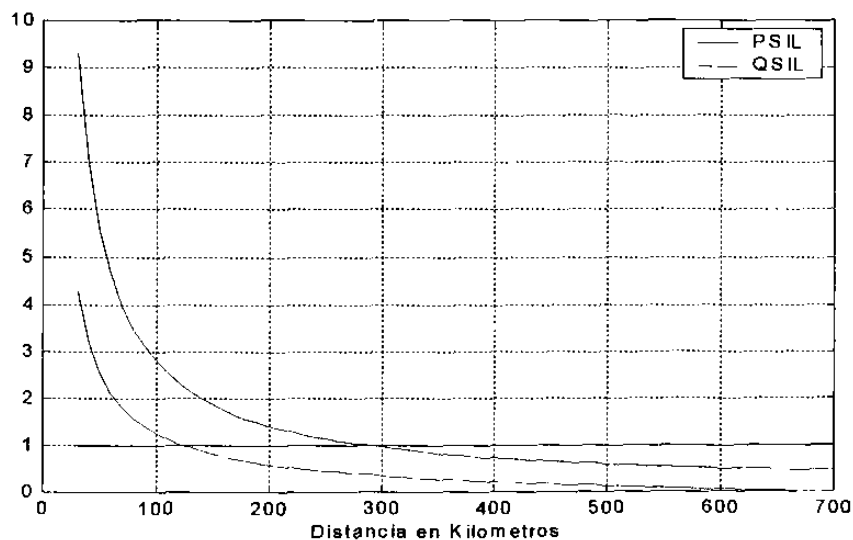


Fig. 4.2.b Curvas de transferencia de potencia normalizadas al SIL, línea desbalanceada sin pérdidas.

Las figuras anteriores representan la máxima transferencia de potencia trifásica en p.u. del SIL, a través de la línea de transmisión sin pérdidas.

Para obtener las curvas anteriores se supone una separación angular entre máquinas equivalentes que asegure un margen de estabilidad apropiado. En este caso se considera que un valor adecuado para la separación angular de máquinas equivalentes es de 30° .

Utilizando las herramientas del Capítulo 2 y las expresiones de la Tabla 4.1, se puede obtener una ecuación para cada circuito modal equivalente, y analizar el caso de líneas de transmisión desbalanceadas, como lo muestra la Figura 4.2.b.

Las consideraciones hechas en esta formulación para obtener las curvas anteriores son una aproximación a la capacidad real de transferencia de las líneas de transmisión. En la próxima sección se analiza una propuesta que permita extender el análisis de cargabilidad a líneas de transmisión desbalanceadas, mediante una formulación más precisa.

4.5 Análisis Generalizado de Cargabilidad

4.5.1 Análisis de Líneas de Transmisión Balanceadas

Es común, en el análisis de los sistemas eléctricos, sobre todo en el ambiente de planeación, la suposición de que los sistemas son totalmente balanceados. Esta suposición reduce en gran medida la complejidad del problema ya que basta con resolver el problema para la secuencia positiva y será posible conocer los valores de las variables asociadas con las tres fases del sistema.

Para que una línea de transmisión sea totalmente balanceada, analizado este concepto desde el punto de vista de la matriz de impedancias o matriz de admitancias, quiere decir que todos los efectos mutuos entre las fases son iguales; y que la diagonal de la matriz tiene elementos iguales.

Para que los efectos mutuos tengan el mismo valor, se recuerda que los parámetros de la línea son calculados mediante (2.15), la cual obtiene los coeficientes de potencial de Maxwell, como el logaritmo natural de una relación de distancias; de un conductor con respecto a cada uno de los otros conductores. Así, si se desea analizar la línea de transmisión en condiciones balanceadas se tendrá que igualar los elementos fuera de la diagonal de la matriz por medio de los coeficientes de Maxwell. Una forma de lograr lo anterior es si se considera una línea de transmisión de longitud d , compuesta por tres segmentos de longitud $d/3$ cada uno, y que al final de cada segmento se efectúa una transposición de conductores.

El efecto es que al final de la línea de transmisión cada conductor habrá ocupado tres posiciones diferentes, como lo muestra la Figura 4.3.

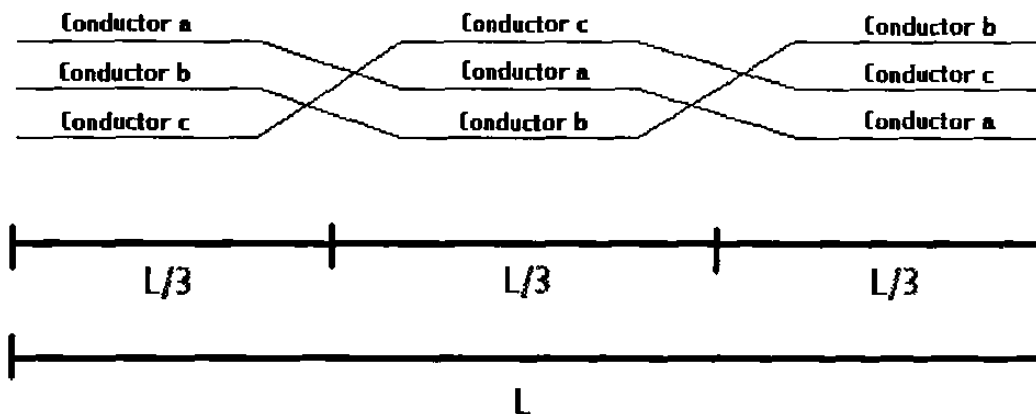


Fig. 4.3 Segmentos de transposición de una línea de transmisión.

Para el análisis de cargabilidad de una línea de transmisión con una característica de transposición completa, basta con resolver el sistema para la secuencia positiva, o aplicar el análisis modal que resolverá los tres circuitos equivalentes. Por ambos procedimientos se obtendrá la misma solución. La Figura 4.4 muestra los resultados de un análisis de cargabilidad para una línea de transmisión, la potencia en por unidad que representa el eje de las ordenadas es una potencia de una sola fase, para compararse con la figura 4.2b se debe considerar que en el caso de la figura 4.2b la potencia es la suma de las tres fases, de características establecidas en la Figura 3.2 y en el Apéndice A.

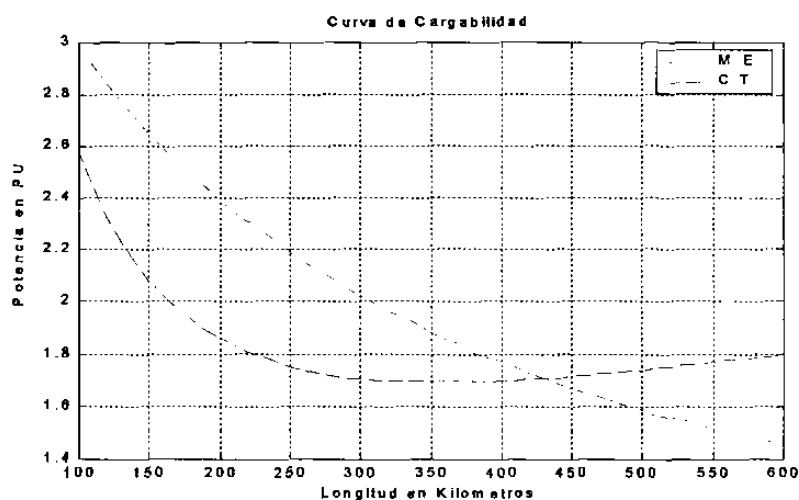


Fig. 4.4 Curvas de cargabilidad de una línea de transmisión balanceada.

Donde :

ME Representa el límite de transferencia por estabilidad
CT Representa el límite de transferencia por caída de tensión

Se considera que la línea de transmisión sirve como enlace para intercambio de energía entre dos sistemas débiles, sin interconexión en otros puntos eléctricos. Por lo anterior se puede representar cada uno por medio de una capacidad de corto circuito de 3,000 MVAs.

El estudio se efectuó tomando en cuenta que el control del voltaje, de las máquinas equivalentes de los sistemas eléctricos interconectados, se puede llevar a cabo sobre el voltaje en terminales de la máquina equivalente. Con esta consideración se puede aplicar un concepto presentado en [19], con las modificaciones anotadas anteriormente sobre los factores de sensibilidad. La finalidad del procedimiento es la de mantener el voltaje en terminales de envío en su valor nominal de 1.0 p.u.

Los límites utilizados para el estudio son del 5 % en caída de tensión y un margen de estabilidad del 30 %. Es importante resaltar que la magnitud de la potencia de envío de la gráfica de la Figura 4.4 corresponde a la potencia monofásica.

Si se lleva a cabo el mismo estudio, pero ahora considerando la línea de transmisión sin pérdidas, se puede comparar los resultados con las curvas normalizadas respecto al SIL de la línea.

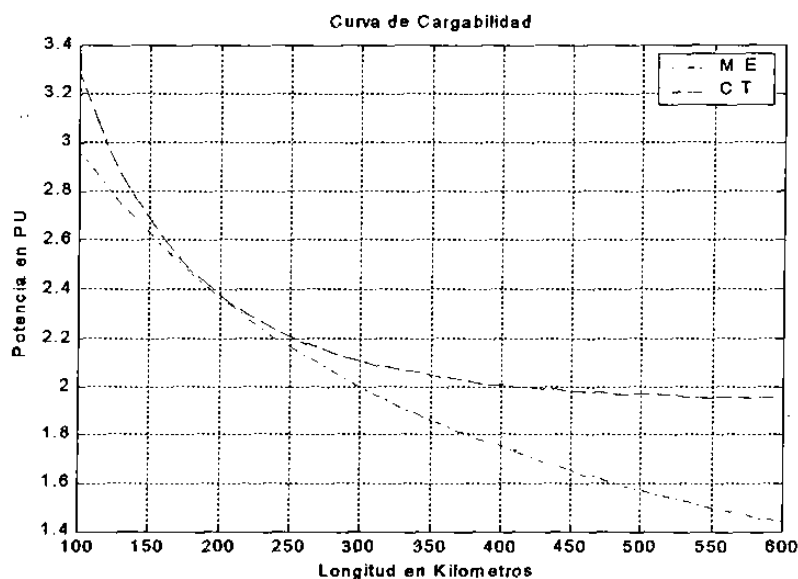


Fig. 4.5 Curvas de cargabilidad de una línea de transmisión sin pérdidas.

Es conveniente recordar al hacer una comparación entre los resultados de la Figura 4.5 y la Figura 4.2a, en el cálculo de las curvas de la Figura 4.2a se supone un perfil de voltajes plano es decir se asume que el voltaje permanece constante en ambos extremos de la línea de transmisión, sin embargo resulta ser una muy buena aproximación para conocer la operación del sistema eléctrico.

4.5.2 Análisis de Líneas de Transmisión de Desbalanceadas

Para estudios de cargabilidad de líneas de transmisión sin transposición se recurre nuevamente al análisis modal, el cual fue estudiado en el Capítulo 2. La diferencia básica es que por cada condición de longitud y de potencia a evaluar se deberán resolver los tres circuitos equivalentes en el dominio modal, de manera similar como se hizo en el análisis de flujos de potencia.

En el sistema eléctrico de potencia mexicano existen líneas de transmisión que no tienen transposición. Este fenómeno, visto desde la información de las matrices de impedancia serie y de admitancia en derivación que caracterizan a una línea de transmisión, significa que los elementos fuera de la diagonal son diferentes entre si, de modo que no se desacopla la solución del sistema mediante una transformación de componentes simétricas. Por este motivo se usa una transformación modal, diferente a la de componentes simétricas.

Con un procedimiento semejante al usado en el caso de líneas balanceadas, pero incluyendo las particularidades mencionadas en el párrafo anterior, se obtiene la Figura 4.6. La figura muestra los resultados de un estudio de cargabilidad para la misma línea de transmisión, conectada a los mismos sistemas equivalentes, pero considerando que es una línea sin transposiciones.

En la Tabla 4.2 se observa los resultados que permiten una comparación de los valores numéricos para los límites de cargabilidad, en los casos de línea balanceada y desbalanceada; con varias longitudes.

En el análisis de los sistemas eléctricos desbalanceados se debe observar, que al mantener la magnitud de una de las fases del voltaje en las terminales de envío en 1.0 p.u., las magnitudes de los voltajes de las otras fases pueden tener valores arriba o abajo de la magnitud del voltaje nominal. La Tabla 4.3 muestra las magnitudes de los voltajes obtenidos para los casos donde se rebasa el límite de caída de tensión. Debe notarse que en el caso balanceado las tres fases tendrán valores iguales ya que mediante el análisis de sensibilidad y durante el estudio se ajustan a 1.0 p.u. En el caso desbalanceado se ajusta el voltaje de la fase *a* en 1.0 p.u. y se observa un comportamiento desigual para las magnitudes de los voltajes en las fases restantes.

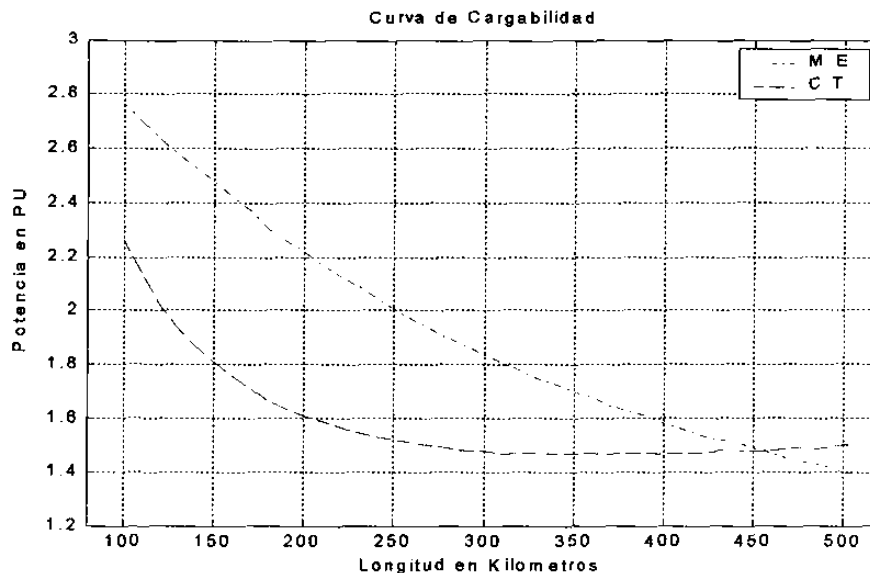


Fig. 4.6 Curvas de cargabilidad de una línea de transmisión desbalanceada.

La curva de la figura anterior representa la máxima transferencia de potencia trifásica de envío a través de una línea de transmisión desbalanceada.

Tabla 4.2 Comparación de límites de una línea balanceada y una línea desbalanceada.

Longitud KM	Línea de Transmisión Transpuesta		Línea No Transpuesta	
	Límite CT	Límite ME	Límite CT	Límite ME
100	2.58	2.98	2.26	2.76
200	1.86	2.39	1.61	2.22
300	1.71	2.02	1.48	1.84
400	1.70	1.77	1.47	1.58
500	1.74	1.59	1.50	1.40

Tabla 4.3 Comparación de voltajes del caso balanceado y caso desbalanceado.

Longitud Km	Línea Transpuesta	Línea de Transmisión No Transpuesta		
	Fase A	Fase A	Fase B	Fase C
100	1.000	1.000	0.9900	0.9499
200	1.000	1.000	0.9874	0.9366
300	1.000	1.000	0.9837	0.9162
400	1.000	1.000	0.9788	0.8898
500	1.000	1.000	0.9726	0.8571

4.6 Equivalentes de Sistemas Interconectados por Múltiples Enlaces

4.6.1 Equivalente Trifásico

En muchos casos no es suficiente un solo enlace para el intercambio de potencia entre sistemas, en este caso se utilizan líneas de transmisión de doble o más circuitos por el mismo derecho de vía, aunque no necesariamente deban estar en paralelo.

El planteamiento del estudio en este caso se efectúa como se estableció en el Capítulo 2, pero llegando a una matriz reducida de 6×6 , la cual representa al equivalente del sistema visto desde dos nodos trifásicos.

La Figura 4.7 muestra el tipo de configuración descrita. Sin embargo, puede ser que los enlaces no usen el mismo derecho de vía, de modo que una manera de representar el equivalente del sistema A de la Figura 4.7 puede ser como se muestra en la Figura 4.8.

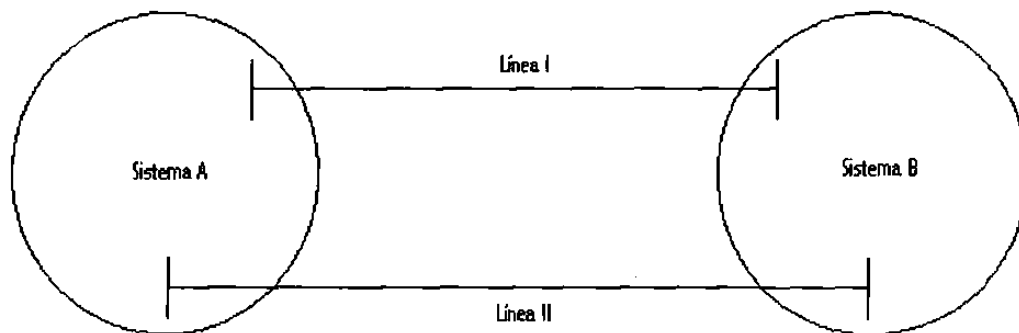


Fig. 4.7 Intercambio de energía mediante enlaces múltiples.

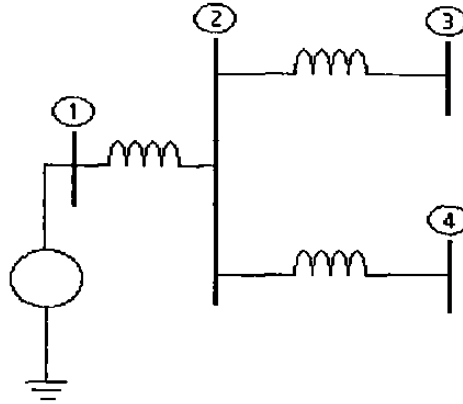


Fig. 4.8 Equivalente de un sistema de múltiples enlaces.

Para la formulación trifásica, el equivalente del sistema de múltiples enlaces de la Figura 4.8, se obtiene suponiendo que se conoce la matriz de impedancias nodales del sistema de N nodos, como (4.16). Esta matriz contiene los equivalentes de Thévenin vistos desde cualquier conjunto de nodos de la red [3].

$$Z_{sist} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & \cdots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & \cdots & Z_{2N} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & \cdots & Z_{3N} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & \cdots & Z_{4N} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & \cdots & Z_{5N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & Z_{N3} & Z_{N4} & Z_{N5} & \cdots & Z_{NN} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

El equivalente de Thévenin, visto desde los nodos 3 y 4 por ejemplo, se obtiene por medio de la submatriz Z_{34}^{eq} .

$$Z_{34}^{eq} = \begin{bmatrix} Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Los elementos de la submatriz (4.17) representan los cambios en los voltajes de los nodos 3 y 4 ante inyecciones de corriente en los nodos, como lo muestra (4.18).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_3 \\ \Delta I_4 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Si se separa la expresión matricial (4.18) en dos ecuaciones simultaneas y reordenando los términos, se obtiene las expresiones (4.19) y (4.20).

$$\Delta V_3 = Z_{33} \Delta I_3 + Z_{34} \Delta I_4 = Z_{33} \Delta I_3 + Z_{34} \Delta I_4 + Z_{34} \Delta I_3 - Z_{34} \Delta I_3 \quad (4.19)$$

$$\Delta V_4 = Z_{34} \Delta I_3 + Z_{44} \Delta I_4 = Z_{34} \Delta I_3 + Z_{44} \Delta I_4 + Z_{43} \Delta I_4 - Z_{43} \Delta I_4$$

$$\Delta V_3 = (Z_{33} - Z_{34}) \Delta I_3 + Z_{34} (\Delta I_3 + \Delta I_4) \quad (4.20)$$

$$\Delta V_4 = Z_{43} (\Delta I_3 + \Delta I_4) + (Z_{44} - Z_{43}) \Delta I_4$$

Como la matriz Z_{SIST} dada por (4.16), es una matriz simétrica con respecto a la diagonal, se tiene que Z_{34} es igual a Z_{43} , y por la simetría se puede dibujar un sistema equivalente, visto desde los nodos 3 y 4; el cual se muestra en la Figura 4.8. Si se representan los equivalentes de cada sistema y se conectan las líneas de enlace, el sistema de estudio queda como lo muestra la Figura 4.9.

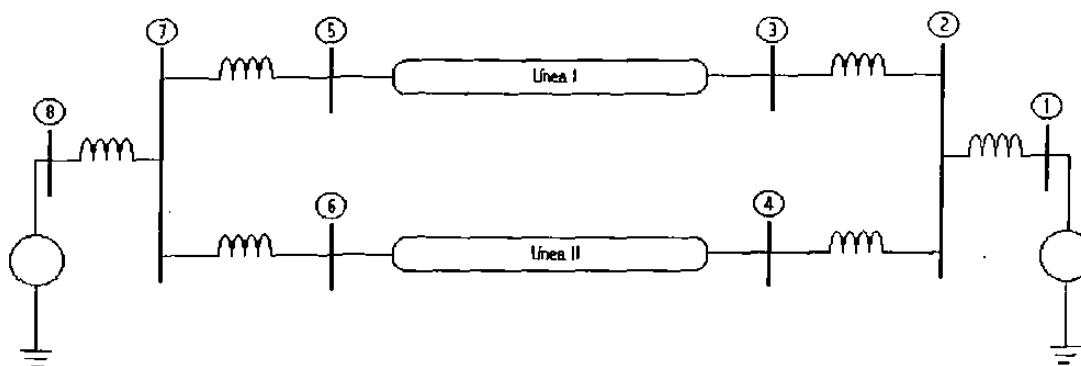


Fig. 4.9 Sistema equivalente de enlaces múltiples.

En la Figura 4.9 y para los estudios planteados se supone que el resto del sistema es balanceado, y que solamente las líneas de transmisión que representan las interconexiones son desbalanceadas. Para tener una mejor representación del sistema a estudiar ambas líneas tienen su propio desbalance, ya que pueden ser de longitud, arreglos geométricos, y conductores diferentes. Por esta razón se presenta un análisis trifásico [1].

El problema requiere una formulación de flujos de carga en componentes de fase; para este efecto se usa el análisis nodal básico [8], y se representa solamente la secuencia del análisis. Con este procedimiento se busca mostrar cómo operan ambas líneas de transmisión de forma adecuada, tal que se puedan mantener dentro de sus límites de cargabilidad. Se encuentra la primera línea que llegue a su límite, pero se sigue incrementando la potencia por la línea que aun tiene capacidad de manejar potencia; ya que sus límites no han sido rebasados.

Para el control del flujo de potencia activa por la línea de transmisión que rebasa primero sus límites de transmisión, se puede aplicar transformadores defasadores; los cuales no son modelados en esta tesis. Otros métodos pueden ser usados, como los que permiten los elementos FACTS para controlar la diferencia angular entre el nodo de envío y el nodo de recepción, o el control que modifica el valor de la reactancia de la línea.

4.7 Formulación para el Estudio de Flujos

Para la formulación del estudio de flujos de la red de la Figura 4.9, las reactancias entre los nodos 2 y 3; 2 y 4; 5 y 7; 6 y 7 son modeladas como transformadores equivalentes, con una conexión Y-Y sólidamente aterrizada. Sin embargo, para el caso que se muestra, se pueden usar otras conexiones del transformador, sin perder de vista que la matriz resultante es de 6x6 y representa un equivalente de todo el sistema. Este artificio permite utilizar al equivalente como un transformador. Para el modelado del transformador equivalente, se parte de la Figura 4.10.

De la modelación del transformador trifásico [1] se obtiene una matriz de admitancias en coordenadas de fase abc , como la mostrada en (4.21). El modelo representa un transformador Y-Y, sólidamente aterrizado.

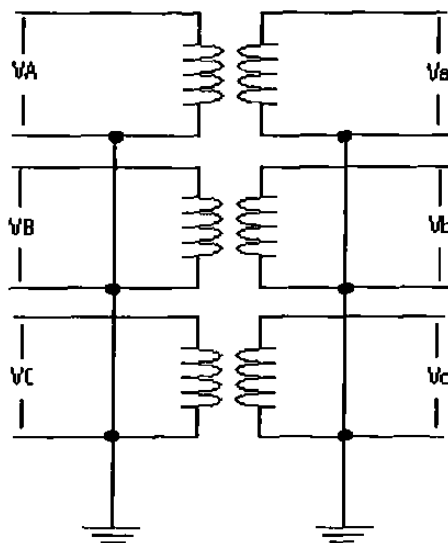


Fig. 4.10 Conexión Y-Y, transformador equivalente para representar al sistema.

$$Y_{TRO} = \begin{bmatrix} yt & 0 & 0 & -yt & 0 & 0 \\ 0 & yt & 0 & 0 & -yt & 0 \\ 0 & 0 & yt & 0 & 0 & -yt \\ -yt & 0 & 0 & yt & 0 & 0 \\ 0 & -yt & 0 & 0 & yt & 0 \\ 0 & 0 & -yt & 0 & 0 & yt \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Los valores de las reactancias entre los nodos 1 y 2; 7 y 8 se obtienen de la información de la capacidad de corto circuito de los sistemas equivalentes; de manera similar a como se procede en el caso de una sola línea de transmisión.

El análisis nodal básico [8] consiste en que conocidas las potencias inyectadas a los nodos y mediante una condición inicial de voltajes, se determinan las corrientes inyectadas a los nodos. Con las corrientes nodales y la matriz de admitancia nodal Y_{bus} del sistema, se calculan los nuevos voltajes nodales. El proceso iterativo se repite hasta que se cumple con una tolerancia preestablecida; entre las potencias calculadas y las potencias especificadas. El procedimiento es similar al usado en los métodos de estudios de flujos convencionales.

4.7.1 Matriz de admitancia nodal en coordenadas de fase *abc*

La matriz de admitancias nodal Y_{bus} , en coordenadas de fase *abc*, para el sistema de la Figura 4.9 resulta ser una matriz de 24x24. La formación de la matriz Y_{bus} es similar a la formación de la matriz Y_{bus} de secuencia positiva; es decir, los elementos de la diagonal representan la suma de todas las admitancias de las ramas conectadas a la barra, y los elementos fuera de la diagonal son el negativo de las admitancias de las ramas entre las barras.

Sin embargo, debe notarse que cada admitancia será una submatriz de tamaño 3×3 . La matriz Y_{bus} del sistema trifásico tiene características como son: simetría con respecto a la diagonal, es una matriz cuadrada y dispersa.

La matriz de admitancia nodal Y_{bus} del sistema a estudiar toma la forma que se muestra en (4.22). Cada elemento de la matriz contiene una submatriz de 3×3 , correspondiente a las matrices en *abc* de cada elemento. En el caso de los transformadores equivalentes las submatrices se obtienen de (4.21), como lo muestra (4.23).

$$[Y_{BUS}] = \begin{bmatrix} Y_{S1} & -Y_{S1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_{S1} & Y_{S1} + Y_{T1}^I + Y_{T2}^I & Y_{T1}^{II} & Y_{T2}^{II} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{T1}^{III} & Y_{T1}^{IV} + Y_{ZL1} + Y_{L1m} & 0 & -Y_{ZL1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{T2}^{III} & 0 & Y_{T2}^{IV} + Y_{ZL2} + Y_{L2m} & 0 & -Y_{ZL2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_{ZL1} & 0 & Y_{T3}^I + Y_{ZL1} + Y_{L1m} & 0 & 0 & Y_{T3}^{II} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{ZL2} & 0 & Y_{T4}^I + Y_{ZL2} + Y_{L2m} & 0 & Y_{T4}^{II} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{T3}^{III} & Y_{T4}^{III} & Y_{T4}^{IV} + Y_{T3}^{IV} + Y_{S2} & -Y_{S2} & -Y_{S2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_{S2} & Y_{S2} & Y_{S2} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$Y_{TRO} = \begin{bmatrix} Y_{T1}^I & Y_{T1}^{II} \\ Y_{T1}^{III} & Y_{T1}^{IV} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

En (4.22) las submatrices Y_{S1} corresponden a los equivalentes de los sistemas, obtenidos mediante la capacidad de corto circuito. Las submatrices Y_{L1m} representan la admitancia capacitiva en derivación de la línea de transmisión. La admitancia serie del modelo π , mostrada en la Figura 4.11, es Y_{ZL1} . En ambos casos se ha considerado los efectos mutuos entre las fases.

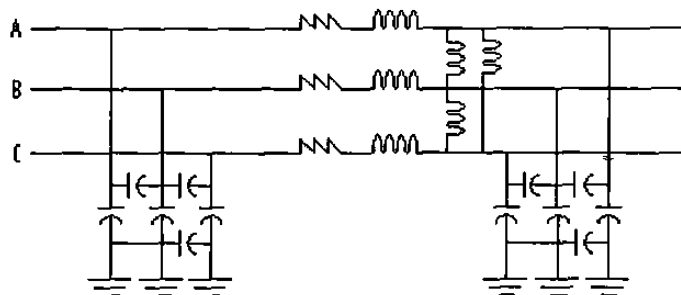


Fig. 4.11 Modelo Trifásico de la línea de transmisión.

4.8 Factores de Sensitividad

Para mantener el voltaje en terminales de la máquina equivalente barra 7, la cual representa al sistema de la Figura 4.9, se lleva a cabo un análisis similar al efectuado para el caso con una sola línea de transmisión, tal como se presentó en la Sección 4.3. En este caso se considera un estudio del sistema mediante el método desacoplado rápido, habiendo eliminado el renglón y la columna correspondiente a la barra compensadora. El análisis se muestra por medio de (4.24).

$$\begin{bmatrix} B_{22} & B_{23} & B_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{32} & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 & 0 & 0 \\ B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} & 0 & 0 \\ 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 & B_{57} & 0 \\ 0 & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} & B_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_{75} & B_{76} & B_{77} & B_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{87} & B_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta Q_6 \\ \Delta Q_7 \\ \Delta Q_8 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

En la expresión (4.24) se observa que la única potencia reactiva que se puede incrementar, con la finalidad de mantener la magnitud del voltaje de la barra 7 en 1.0 pu, es la potencia reactiva inyectada en la barra 8. En la barra 8 se tiene conectada una máquina equivalente, y además si ΔV_7 es conocido, entonces (4.25) muestra el valor de la inyección reactiva requerida sobre las barras 5 y 6.

$$\begin{bmatrix} B_{22} & B_{23} & B_{24} & 0 & 0 \\ B_{32} & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -B_{57} \Delta V_7 \\ -B_{67} \Delta V_7 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Se calculan los incrementos en las magnitudes de los voltajes, y se sustituyen en (4.26), que es el sexto renglón de la expresión (4.24).

$$\Delta V_8 = -\frac{1}{B_{78}} (B_{75} \Delta V_5 + B_{76} \Delta V_6 + B_{77} \Delta V_7) \quad (4.26)$$

Si ahora se sustituye en el último renglón de (4.24), para determinar el incremento requerido de potencia reactiva que ha de inyectarse en la barra 8.

$$\Delta Q_8 = B_{87} \Delta V_7 + B_{88} \Delta V_8 \quad (4.27)$$

De esta forma se obtiene el incremento de potencia reactiva; en la iteración que se está efectuando dentro del estudio de flujos. Con este procedimiento se asegura que la magnitud del voltaje de la barra 8, permanecerá con un valor de 1.0 p.u.

4.9 Análisis de Cargabilidad

La importancia de llevar a cabo un análisis de cargabilidad, para enlaces desbalanceados de sistemas eléctricos previamente interconectados, mediante enlaces múltiples es con la finalidad de determinar el nivel de transferencia de energía por cada enlace; ya que tales líneas pudieran no estar conectadas en paralelo. Es importante considerar que deben existir controles para manejar el flujo de potencia y así determinar el nivel de congestionamiento de los enlaces del sistema.

El caso de prueba que ilustra los conceptos desarrollados en el presente capítulo será un ejemplo que contempla dos líneas de características semejantes a las analizadas anteriormente. Los datos se presentan en el Apéndice A y muestran las matrices equivalentes de impedancia serie y de admitancia en derivación; Tabla 4.4. En la Tabla 4.4 las matrices de impedancias y de admitancias equivalentes se muestran para una línea de transmisión balanceada y para una línea desbalanceada. Los datos están dados en p.u./km, con una base de potencia de 300 MVA trifásicos y un voltaje nominal de 400 kV.

La importancia de un estudio como el planteado, y que se ilustra en la Figura 4.12, radica esencialmente en determinar la capacidad total de intercambio de energía entre los sistemas interconectados con una capacidad de corto circuito de 10000 MVA cada uno antes de la construcción de los enlaces. Para este caso es importante tener un conocimiento completo de la topología de los sistemas o bien contar con la información que guarda la matriz de impedancias Z_{nodal} , de los sistemas a interconectar.

La finalidad es determinar los valores de las matrices equivalentes, las cuales pueden ser modeladas como transformadores equivalentes en el análisis de cargabilidad.

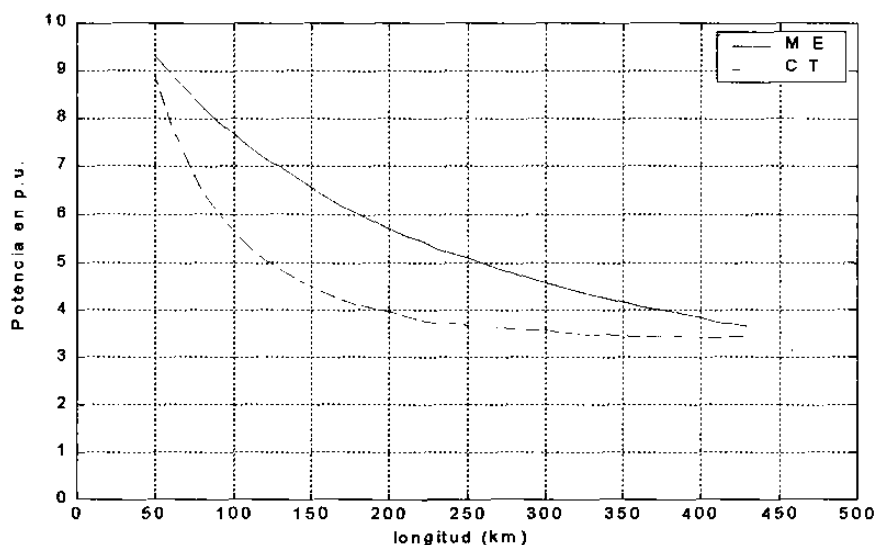


Fig. 4.12 Análisis de Cargabilidad de Sistemas de Múltiples Enlaces.

La curva anterior representa la máxima transferencia de potencia trifásica que puede enviarse a través de el sistema de transmisión, para varias longitudes.

Tabla 4.4 Matrices de Impedancia y Admitancia de la línea de transmisión del Apéndice A.

Línea de transmisión balanceada			Línea de transmisión desbalanceada		
$Z_{abc} \quad x10^{-3} \text{ p.u.}$					
0.202+0.879i	0.108+0.303i	0.108+0.303i	0.202+0.874i	0.108+0.333i	0.108+0.244i
0.108+0.303i	0.202+0.879i	0.108+0.303i	0.108+0.333i	0.202+0.888i	0.108+0.333i
0.108+0.303i	0.108+0.303i	0.202+0.879i	0.108+0.244i	0.108+0.333i	0.202+0.874i
$Y_{abc} \quad x10^{-3} \text{ p.u.}$					
0.0024i	-0.0004i	-0.0004i	0.0024i	-0.0005i	-0.0002i
-0.0004i	0.0024i	-0.0004i	-0.0005i	0.0024i	-0.0005i
-0.0004i	-0.0004i	0.0024i	-0.0002i	-0.0005i	0.0024i

Para determinar los límites de cargabilidad del análisis anterior, se considera la caída de voltaje y la separación angular de las barras comunes a los dos enlaces que son la barra 2 y la barra 7. Si se deseara cargar el sistema de transmisión, de manera que cada línea estuviera en sus propios límites de cargabilidad, las referencias para la caída de tensión y la separación angular para cada máquina deberán ser las barras 3 y 5 para la primer línea y las barras 4 y 6 para la segunda línea.

4.10 Análisis de Resultados y Observaciones

En esta sección se resaltan los resultados más importantes obtenidos durante el desarrollo de los estudios de cargabilidad de líneas de transmisión desbalanceadas. En la Tabla 4.2 se puede observar la importancia de incluir los desbalances en los análisis de los sistemas eléctricos, dado que las decisiones operativas pueden poner en riesgo la seguridad del sistema por usar un modelo simplificado; sin considerar los desbalances de la red eléctrica.

Si se incluyen los desbalances de las líneas de transmisión al determinar los límites operativos, se puede notar la necesidad de mantener en observación las magnitudes de los voltajes de las fases que no se controlan, como se ve en la Tabla 4.3.

Además puede plantearse como una posible solución, para este tipo de líneas descritas en el Apéndice A, que son líneas generalmente largas y de alto voltaje, el incluir dispositivos tipo FACTS o algún otro tipo de control que sea conveniente para el control del flujo de potencia por el enlace, ya que como lo muestra la Tabla 4.5, se puede tener un mejor comportamiento para los voltajes de las fases no controladas.

Para los resultados obtenidos en la Tabla 4.5, se aplicó un desbalance en la carga a suministrar por la línea de transmisión. Se puede observar el impacto sobre las magnitudes de los voltajes y de esta manera se abre un campo de estudio para aplicar dispositivos para el control del flujo de potencia, siendo ésta una forma de contrarrestar los desbalances propios de las líneas de transmisión.

Tabla 4.5 Efecto del control del flujo de potencia en las magnitudes de voltaje.

<i>Línea de transmisión</i>	<i>sin control</i>		<i>con control</i>	
	<i>envío</i>	<i>recepción</i>	<i>envío</i>	<i>recepción</i>
Fase a	1.0000	0.9497	1.0000	0.9612
Fase b	0.9823	0.9528	1.0154	0.9648
Fase c	0.9124	0.9313	0.9873	0.9667

Los resultados mostrados en la Tabla 4.5 corresponden a las magnitudes de voltaje en el instante en que se viola el límite de caída de tensión de un estudio de cargabilidad para una longitud de 300 km. Puede observarse que al aplicar un desbalance en la misma carga se puede modificar el comportamiento del voltaje en el nodo de recepción, que ahora es más balanceado, al menos en magnitud; que en el caso de no tener ningún tipo de control en el flujo de potencia.

Una manera de realizar los desbalances en las carga planteados en el párrafo anterior es hacer uso de los moderno equipos de comunicación y monitoreo de sistemas eléctricos, y explotarlos como una medida para identificar cargas monofásicas que pudieran redistribuirse en alguna fase menos cargada, como una estrategia en las redes de distribución.

Estrategias como la presentada en el párrafo anterior pueden lograr un efecto benéfico en la operación de los sistemas eléctricos. Los desbalances utilizados para los resultados mostrados en la Tabla 4.5 fueron: para la fase a un 95 % de la carga original, para la fase b un incremento del 20 % con respecto al caso de la carga balanceada, siendo esta la fase que suministra la carga que se libera en las otras fases. Finalmente en la fase c la carga quedó en un 85 % de la carga original; por lo tanto se sigue suministrando el total de la carga, y se mejora el voltaje en el nodo receptor con la redistribución de las cargas monofásicas.

Al considerar un sistema interconectado por dos líneas de transmisión, la cargabilidad se incrementa casi al doble de el caso en que se tenía una línea de transmisión, en el margen de estabilidad si se refleja claramente que la máxima transferencia de potencia puede incrementarse al doble, sin embargo el comportamiento del voltaje en el extremo receptor no tiene un comportamiento lineal que pudiera determinar que la cargabilidad se ha elevado al doble incluyendo la segunda línea de transmisión.

En las curvas de cargabilidad mostradas en este capítulo cabe mencionar el significado del punto de intersección de la característica que describe el límite por caída de tensión, con la característica que describe el límite por estabilidad en el sistema de transmisión. Haciendo referencia a la Figura 4.1, en cada incremento de potencia de envío del generador conectado al nodo 1, la separación angular entre máquinas equivalentes se incrementa al tiempo que se incrementa la aportación de potencia reactiva del generador equivalente conectado en el nodo 4, esto ayudado con el efecto capacitivo de las líneas largas ayuda al soporte de voltaje en el nodo receptor, ese punto de intersección es donde la aportación de potencia reactiva requerida por el sistema del generador equivalente conectado al nodo 4 para mantener el voltaje controlado en ese nodo comienza a requerir una separación angular entre las máquinas equivalentes que pudiera poner en riesgo la estabilidad del sistema eléctrico ante alguna perturbación.

CAPITULO 5

ASPECTOS ESTADISTICOS DE ENERGIZACIÓN DE LINEAS DE TRANSMISIÓN

5.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar el uso de herramientas computacionales estadísticas para el estudio de los sistemas eléctricos, la aplicación y entendimiento de este tipo de herramientas proporciona información importante para la toma de decisiones operativas, de planeación, y de mantenimiento de equipos.

Un software de dominio generalizado que ayuda en el estudio de fenómenos transitorios de los sistemas eléctricos es el ATPdraw. La facilidad de construir circuitos que representan a los sistemas eléctricos de manera cercana a los sistemas reales hace del software una herramienta importante en el estudio del comportamiento de los elementos que forman parte de los sistemas eléctricos.

El software de dominio generalizado ATPdraw proporciona dentro de sus librerías un interruptor de características especiales para estudios estadísticos. Este tipo de estudios es importante para determinar bajo que condiciones operan los elementos del sistema ante problemas transitorios de energización y/o desenergización.

El determinar los esfuerzos mecánicos y eléctricos a los que se someten los equipos durante las energizaciones y/o desenergizaciones dependen de las características de la carga y el tiempo de cierre del interruptor, por lo cual resulta de esencial importancia el determinar los efectos sobre la reducción en la vida útil de los equipos.

5.2 Herramientas Computacionales

El tiempo de apertura o cierre de los interruptores en los sistemas eléctricos es totalmente aleatorio, debido a que desde el momento en que se ordena la operación del interruptor hasta la separación de los polos del interruptor, el tiempo de operación puede variar debido a una gran diversidad de factores, tales como las condiciones ambientales, la corrosión, la degradación de la vida útil, etc.

La generación de estos tiempos de operación en el interruptor estadístico del ATPdraw, se efectúa mediante una distribución uniforme de probabilidad de ocurrencia. Esto quiere decir que dentro de un ciclo de la señal de 60 Hz, cualquier instante de tiempo tiene la misma probabilidad para que ocurra el cierre del interruptor, con una cierta desviación estándar que es proporcionada por el usuario. El software ATPdraw también proporciona la posibilidad de establecer una distribución de probabilidad Gaussiana, si fuera el caso, para dar una distribución de probabilidad de ocurrencia del cierre siguiendo tal distribución.

5.2.1 Interruptor Estadístico de ATPdraw

El elemento que simula un interruptor estadístico en el ATPdraw, proporciona una herramienta que permite dar una interpretación, mediante un análisis estadístico, al fenómeno de energización de líneas de transmisión.

La finalidad, como se estableció en la introducción de este capítulo, es la de determinar las condiciones críticas de operación de los interruptores. Es conocido que en la condición de pre-energización la diferencia de potencial entre los polos del interruptor de una línea que alimentará una carga puramente pasiva, como lo muestra la Figura 5.1, es igual al voltaje de la fuente de alimentación.

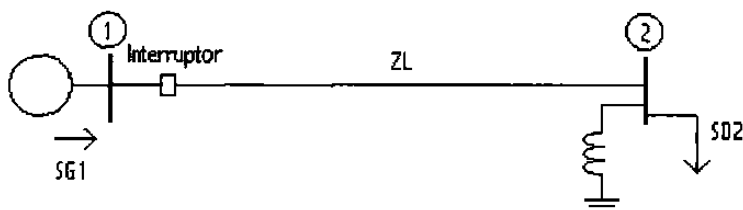


Fig. 5.1 Sistema de prueba para el interruptor estadístico.

Una característica importante de un gran número de cargas en el sistema eléctrico de potencia es que son predominantemente inductivas. Así, en el momento de operación del interruptor se producirá una sobrecorriente, como resultado de forzar el voltaje entre polos del interruptor a un valor cero. La sobrecorriente que se presenta por algunas fracciones de segundo, dado que la carga es predominantemente inductiva, está atrasada en casi 90° eléctricos respecto al voltaje y pudiera en algunos casos provocar una operación incorrecta de protecciones. En los casos más críticos puede causar un daño mecánico permanente al interruptor.

Un ejemplo de este fenómeno se ilustra en la Figura 5.2, para la operación del interruptor al cerrar la fase en 16.7 milisegundos.

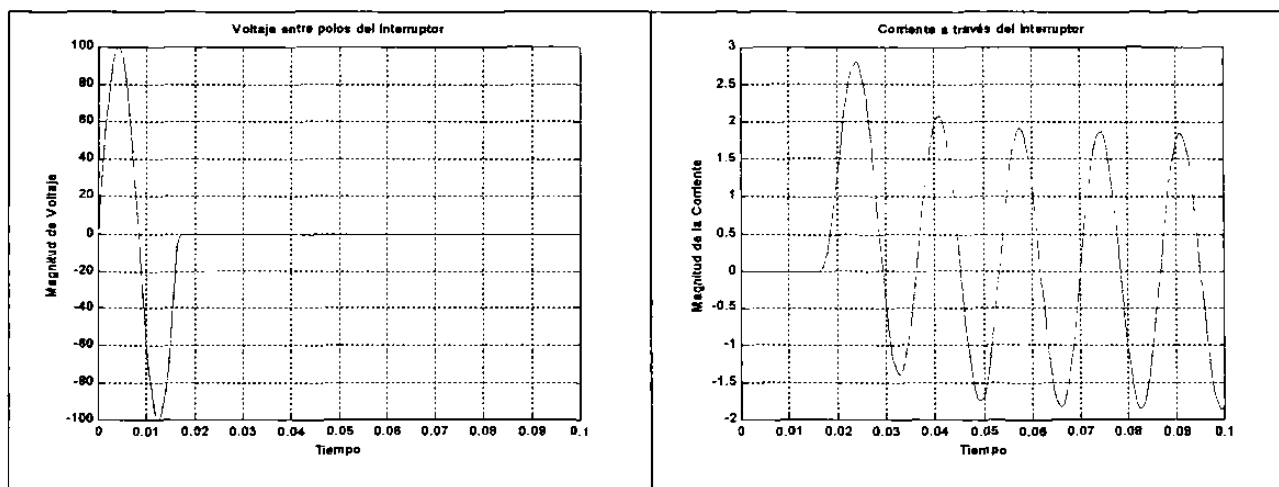


Fig. 5.2 Sobrecorriente característica de una energización.

El interruptor estadístico genera aleatoriamente, mediante un estudio Montecarlo, un espacio muestral y calcula las magnitudes del pico máximo de la corriente que pasará a través del interruptor; se calcula otra información, como el tiempo de ocurrencia de ese valor máximo.

El interruptor requiere como parámetros de entrada, por medio de su menú principal, únicamente una media de tiempo y una desviación estándar. Se tiene la opción de elegir entre una distribución Gaussiana o una distribución Uniforme del tiempo de operación, que como se mencionó en la introducción la elección del tipo de distribución a usar depende si el estudio desea efectuarse permitiendo que el interruptor tenga la misma probabilidad de operar en cualquier tiempo o si se desea dar una mayor probabilidad a algún rango de tiempo, una vez que se manda la orden de cierre del circuito.

En un menú secundario se tienen opciones como la magnitud de puntos muestrales que desea obtener mediante el estudio. También se presentan opciones de despliegue de datos para descargarlos sobre algún procesador de textos.

5.2.2 Software de Estadísticas JMP

Para el manejo estadístico de los datos obtenidos a la salida del simulador ATPdraw se usó el software JMP de estadísticas del autor John Sall. Este software proporciona, entre otras, la ventaja de efectuar múltiples estudios con el fin de definir completamente las características estadísticas en la operación de un interruptor de potencia. Además de múltiples salidas gráficas, que permiten una mejor visualización de los resultados de los estudios.

Como se estableció el objetivo principal de este capítulo es comprobar mediante un análisis estadístico la fuerte relación existente entre el tiempo de operación de un interruptor de potencia y el pico de la corriente máxima a través del interruptor al energizar una carga predominantemente inductiva.

La carga es alimentada por una línea de transmisión larga y de naturaleza desbalanceada; las características de la línea son mostradas en el Apéndice A.

El explicar la importancia de la aplicación de este tipo de herramientas en el estudio de los sistemas eléctricos es fundamental, debido al comportamiento aleatorio de las variables que describen la operación de los elementos del sistema eléctrico, tales como el tiempo de retardo del interruptor desde que se da la señal de cierre, hasta que logra éxito en el cierre de contactos.

5.3 Tiempo de Energización

Como espacio muestral para el interruptor estadístico del ATPdraw, el tiempo aleatorio de cierre se eligió con una distribución de probabilidad uniforme. La distribución uniforme permite dar igual peso probabilístico a cualquier voltaje para las condiciones de pre-cierre y que aparecerá entre polos del interruptor, tal como se muestra en la Figura 5.3.

De esta manera se tiene la misma probabilidad para que el interruptor cierre cuando el voltaje entre polos cruce por cero o cuando el voltaje a través del interruptor cruza por un máximo. Con la generación de un vector de valores de tiempo aleatorio producido por el ATPdraw y calculados los picos máximos de corriente, para cada tiempo de cierre, se tiene la Figura 5.4.

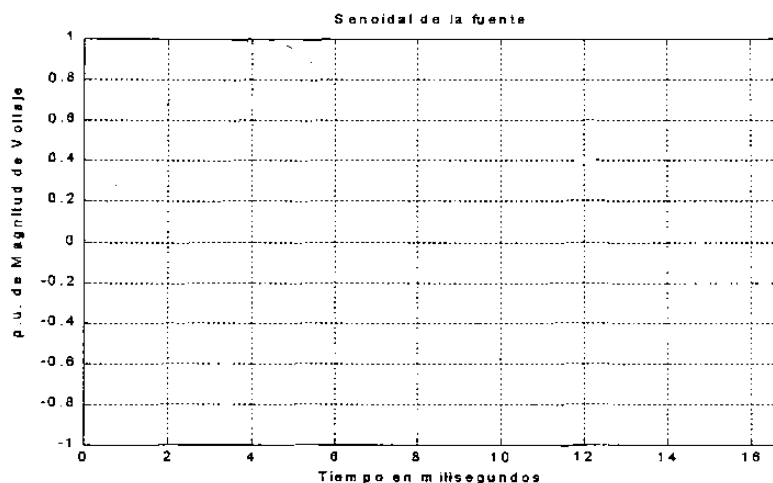


Fig. 5.3 Señal de voltaje entre polos del interruptor antes del cierre.

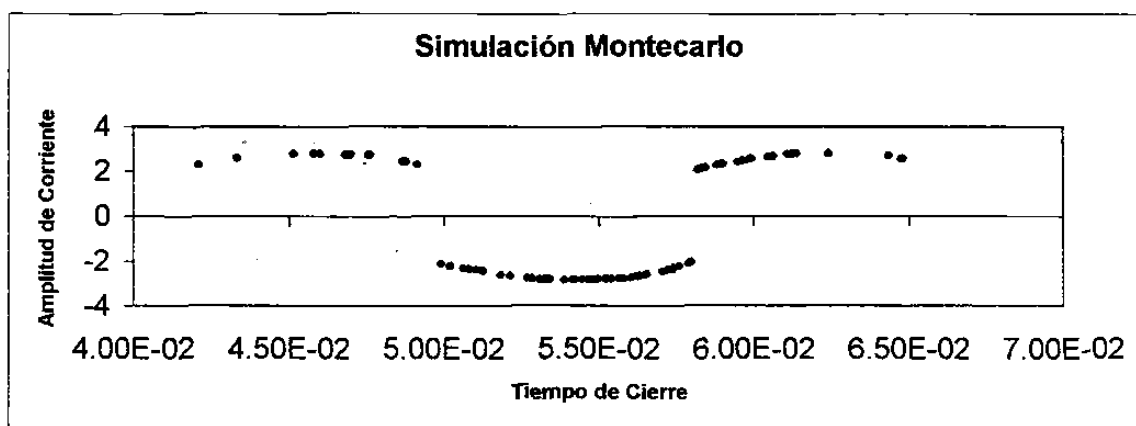


Fig. 5.4 Resultados del interruptor estadístico de la simulación Montecarlo de cierres aleatorios.

5.4 Análisis Estadístico

El análisis estadístico tiene como finalidad procesar la información generada por el interruptor y obtener indicación de índices estadísticos respecto a la máxima corriente y el tiempo de operación del interruptor.

5.4.1 Correlación

Mediante el uso del software JMP [9] se puede calcular la correlación entre las variables principales que son el tiempo de cierre del interruptor y la magnitud máxima de corriente que debe soportar el interruptor, en caso de cerrar en ese instante. Se debe observar de la Figura 5.4, que hay dos conjuntos en forma de semicírculos que se repiten, lo cual indica que de un semicírculo a otro existen 2π radianes de diferencia.

Considerando solamente dos semicírculos, para tomar en cuenta puntos muestrales de tiempo dentro de un ciclo de 60 Hz, se obtiene con la ayuda de una elipse que encierra al 95 %, los puntos correlacionados, como se muestra en la Figura 5.5.

La Figura 5.5 se obtuvo mediante el software JMP, y arroja una correlación de 0.7972, lo cual indica una fuerte relación estadística entre tiempo de cierre del interruptor y la máxima amplitud de corriente. Es importante identificar además que el parámetro de la correlación está definido también por la pendiente de la elipse que encierra una mayor porción de puntos muestrales.

La distribución de los puntos en el espacio muestral se debe identificar de manera que se puede determinar si es conveniente ignorar algunos datos. Por ejemplo, de la Figura 5.5 los puntos muestrales que se encuentran en la parte superior derecha, que son puntos muestrales pertenecientes a otro ciclo de voltaje, es decir si se da un rango de estudio de 16 mseg. es deseable que todos los puntos evaluados pertenezcan al mismo ciclo de voltaje para evitar encontrar otras soluciones.

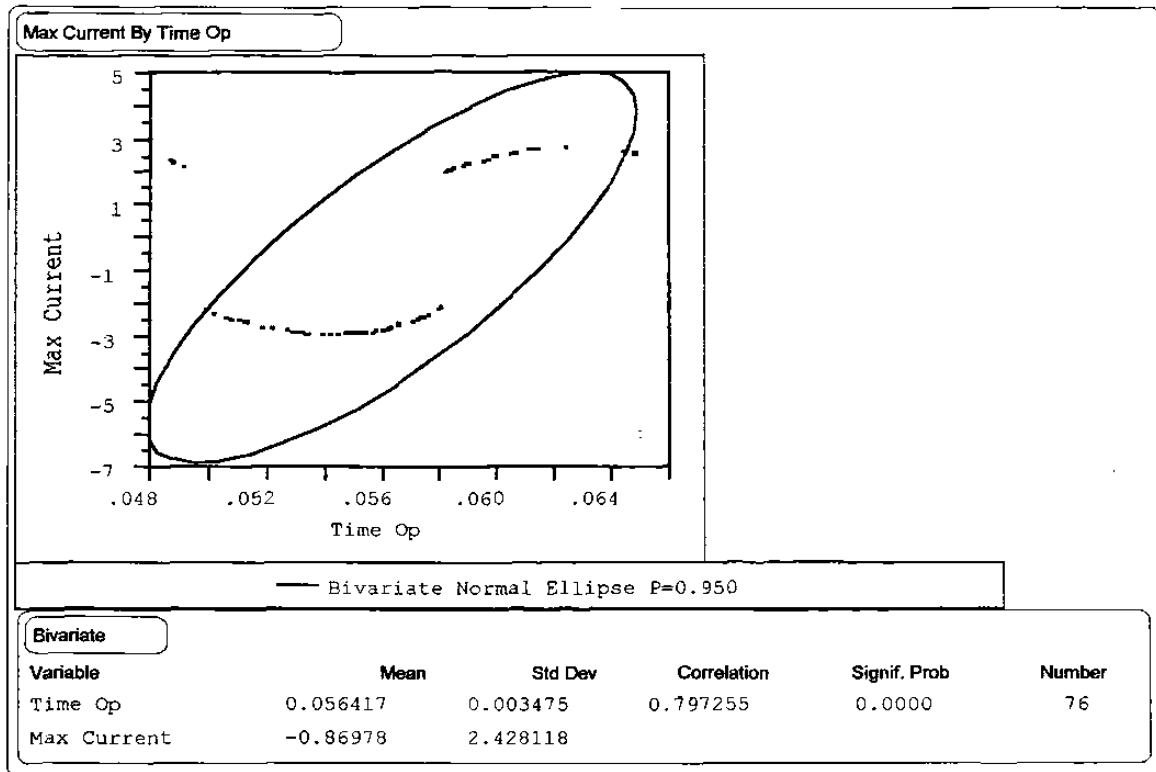


Fig. 5.5 Cálculo de correlación entre tiempo de cierre y corriente máxima.

5.4.2 Densidad de Puntos Muestrales

Dado que una variable aleatoria continua tiene infinitos puntos, tiene una probabilidad cero de tomar cualquier valor particular dentro del espacio muestral. Por lo anterior es muy remota la posibilidad de seleccionar un punto muestral exactamente y no algún otro tan cercano al primero que humanamente no podría medirse la diferencia.

Sin embargo se puede incluir en el análisis el concepto de una vecindad alrededor del punto muestral, así se puede hablar de un intervalo, en lugar de hablar de un solo punto muestral.

Para una variable continua se habla de que para la distribución de probabilidad, se puede tener una fórmula para su representación, la cual debe ser función de los valores numéricos de dicha variable. A esta fórmula se le conoce como función de densidad de probabilidad.

Se puede determinar una función de densidad de probabilidad para la Figura 5.5, y se obtiene una gráfica tridimensional para representar dicha función, como se muestra en la Figura 5.6.

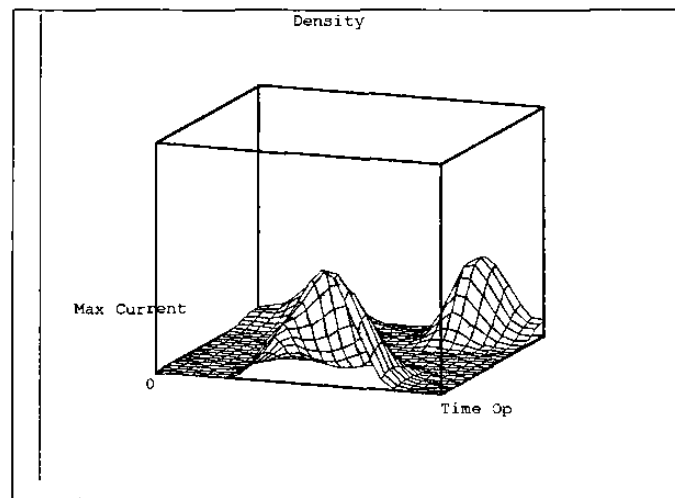


Fig. 5.6 Función de densidad de probabilidad.

También se pueden obtener graficas con contornos para indicar máximas concentraciones de puntos muestrales. La gráfica obtenida es la mostrada en la Figura 5.7.

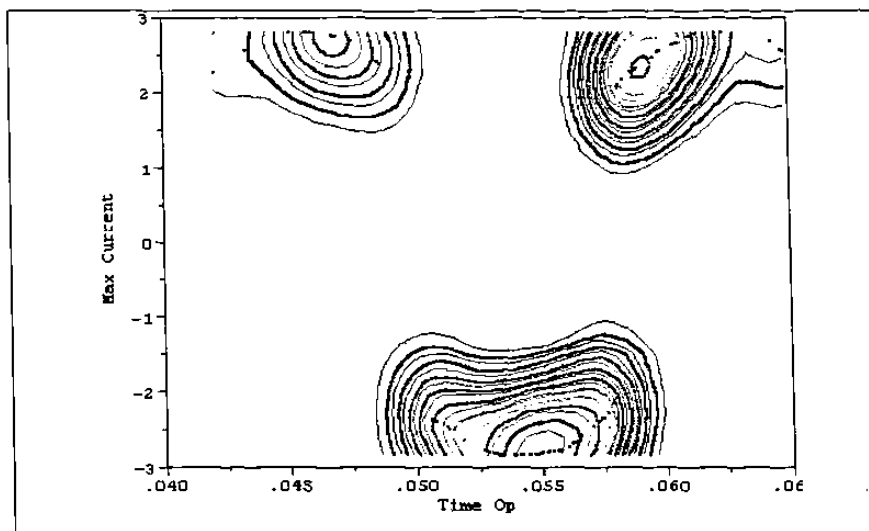


Fig. 5.7 Gráfica de contornos de densidad de probabilidad.

De las Figuras 5.6 y 5.7, se puede observar que los puntos con mayores magnitudes de sobrecorriente tienen una mayor densidad de probabilidad, ya que el estudio Montecarlo realizado en ATPdraw seleccionó un intervalo de tiempo donde se encontraban los tiempos más críticos de cierre del interruptor.

5.5 Observaciones

Por medio de software de dominio público, como el ATPdraw y el software comercial JMP se comprobó la fuerte correlación que existe entre la magnitud del pico máximo de corriente y el tiempo de energización de la línea de transmisión.

Como se muestra en los apartados del capítulo estas herramientas permiten estudiar condiciones de operación que dependen de factores aleatorios, como el caso de cierre de polos en interruptores.

Las herramientas presentadas permiten simular fenómenos que afectan, con una cierta probabilidad la operación, el desgaste y determinan la magnitud de los fenómenos que se presentan durante la operación y el control de los sistemas eléctricos de potencia.

No se plantearon simulaciones tipo Montecarlo para estudiar aperturas de interruptores, esto debido a que es difícil y no recomendable [14] que los interruptores de potencia interrumpan grandes corrientes, y se interrumpe el circuito en el cruce por cero de la corriente. Lo anterior genera ciertas restricciones en la selección de tiempos aleatorios para la simulación. Este es un problema abierto para estudios de tipo estadístico.

CAPITULO 6

RESPUESTA A LA FRECUENCIA DE LINEAS DE TRANSMISION

6.1 Introducción

En este capítulo se presenta el desarrollo de una metodología para el análisis de la respuesta a la frecuencia de líneas de transmisión desbalanceadas. En la planeación y durante la operación de una línea de transmisión, es importante analizar el efecto de la frecuencia sobre los parámetros de la línea. La respuesta a la frecuencia se efectúa con la finalidad de determinar aquellos valores de frecuencia que pudieran poner en riesgo la condición segura del sistema, representada por la condición de resonancia.

Se efectúa además una comparación de los resultados obtenidos mediante la solución de los equivalentes modales obtenidos en el Capítulo 1, con los obtenidos mediante el software de dominio generalizado ATPdraw, los datos de la línea de transmisión de este ejemplo ilustrativo se presentan en el Apéndice A y tiene una matriz de impedancias equivalente como la correspondiente a la segunda línea presentada en la Tabla 4.4, que corresponde a una línea de transmisión desbalanceada.

Estos estudios deben llevarse a cabo con mayor razón en sistemas que operan en ambientes contaminados por corrientes armónicas producidas por cargas no lineales que son altamente utilizadas en la actualidad; tales cargas como controladores de estado sólido para motores, hornos de arco eléctrico, convertidores, etc.. Con los grandes avances tecnológicos que ha alcanzado la electrónica de potencia mediante dispositivos de estado sólido, los sistemas industriales y cada vez mas los sistemas de potencia deben operarse en bandas de frecuencia que permitan una buena confiabilidad del sistema.

6.2 Fenómeno de Resonancia

A determinadas frecuencias el comportamiento del sistema eléctrico, y dependiendo de los parámetros que lo conforman, puede tener un equivalente Thévenin que visto desde un nodo resulta en una impedancia equivalente de valor muy alto o de valor muy pequeño. A los valores de frecuencia en que ocurre alguno de estos fenómenos se les conoce como frecuencias de resonancia. El fenómeno de resonancia puede ser de dos tipos: *resonancia serie* o *resonancia paralelo*, esto depende de la magnitud de la impedancia de Thévenin.

6.2.1 Resonancia Serie

El fenómeno de *resonancia serie* se presenta a frecuencias dónde la magnitud de la impedancia de Thévenin, vista desde algún nodo del sistema, tiene valores muy pequeños. Por ejemplo en la Figura 6.1, se considera un sistema donde una carga eléctrica se alimenta a través de un transformador y es de tal naturaleza que requiere compensación de potencia reactiva. Para corregir el factor de potencia se hace uso de un banco de capacitores.

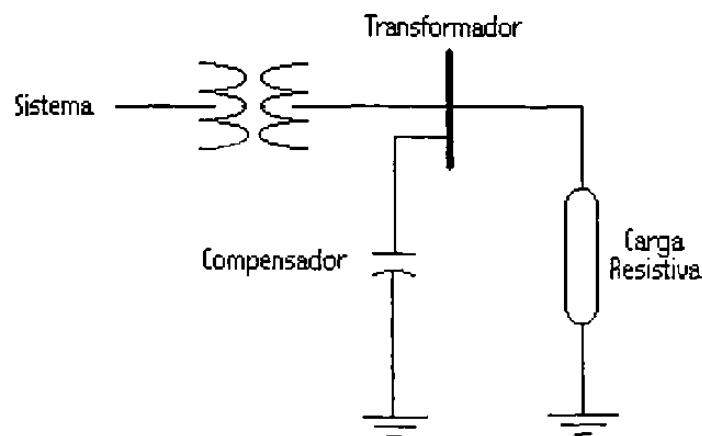


Fig. 6.1 Sistema eléctrico expuesto a una resonancia serie.

En la figura anterior para una operación a altas frecuencias la impedancia equivalente entre el compensador y la carga es predominantemente capacitiva, y existe un valor de frecuencia en que la magnitud de la impedancia inductiva del transformador es igual a la magnitud de la impedancia capacitiva del compensador; pero de signo opuesto. Así, ante la presencia de un voltaje armónico aplicado desde el sistema, pueden fluir grandes corrientes a través del banco de capacitores para esa frecuencia de resonancia.

En la Figura 6.2 se puede observar que si el sistema está expuesto a corrientes y voltaje armónicos, y entre ellos se encuentra alguna componente de 2ª armónica, se producirá un problema de resonancia serie, con los efectos antes mencionados.

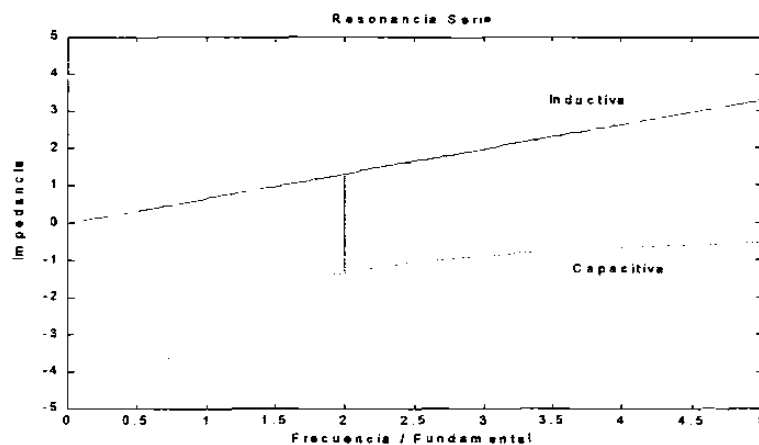


Fig. 6.2 Igualdad de impedancias.

6.2.2 Resonancia Paralelo

Para que se presente un caso de *resonancia paralelo*, la magnitud de la impedancia de Thévenin, vista desde el nodo de estudio del sistema, toma a ciertas frecuencias valores muy grandes.

De esta manera si se considera una inyección de corriente armónica en el nodo y de frecuencia igual a la frecuencia de resonancia del sistema, pueden generarse señales de sobrevoltaje.

Los sobrevoltajes tendrán la misma frecuencia armónica, sobrepuestos sobre la señal de frecuencia fundamental. En el ejemplo de la Figura 6.3, se tiene una carga no lineal, que puede ser origen de corrientes armónicas, y es común que estas fuentes se consideren como fuentes de corriente.

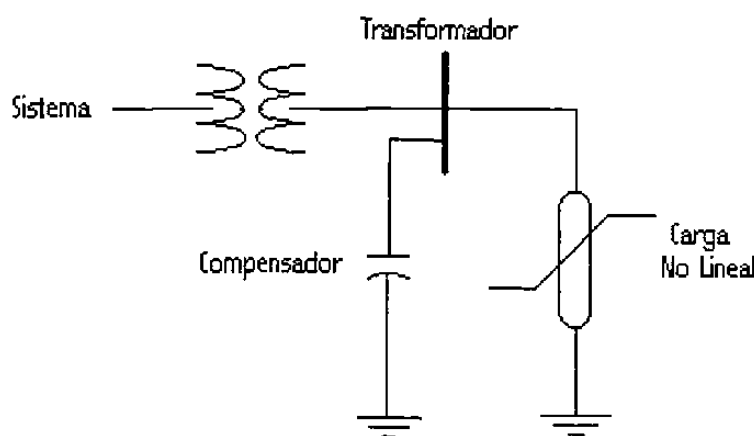


Fig. 6.3 Sistema expuesto a una resonancia paralelo.

Si existe una corriente armónica, producida por la carga no lineal, y si a esa frecuencia se encuentra una resonancia paralelo; la cual se tiene cuando la impedancia equivalente vista desde el nodo de recepción del transformador y el compensador es de valor máximo.

La Figura 6.4, muestra que la magnitud máxima se presenta a una frecuencia igual a la calculada para el caso de la resonancia serie, si para cada caso el equivalente del sistema es visto desde un nodo diferente.

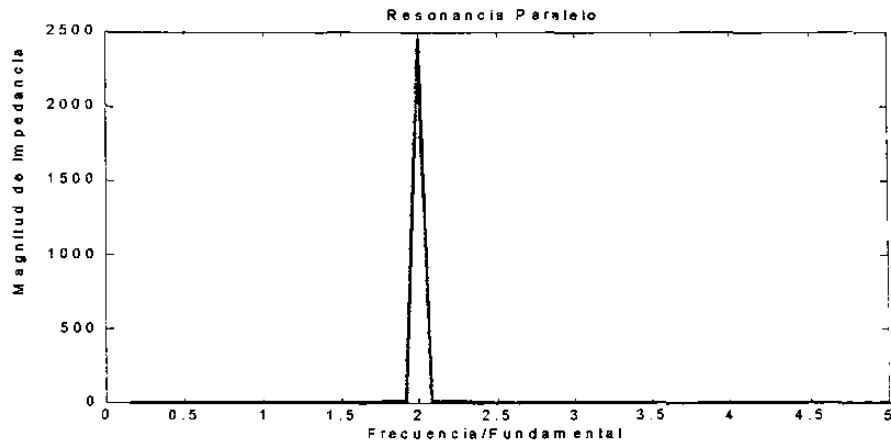


Fig. 6.4 Magnitud de la impedancia vista desde el nodo de recepción.

6.3 Cálculo de Impedancia $Z(\omega)$ dependiente de la frecuencia

Para observar la respuesta a la frecuencia de una línea de transmisión, se calcula la impedancia vista desde el nodo de carga, el cual es un nodo donde existe la posibilidad de tener inyecciones de corrientes armónicas. Para obtener la impedancia se utiliza el artificio [14], mostrado por la Figura 6.5.

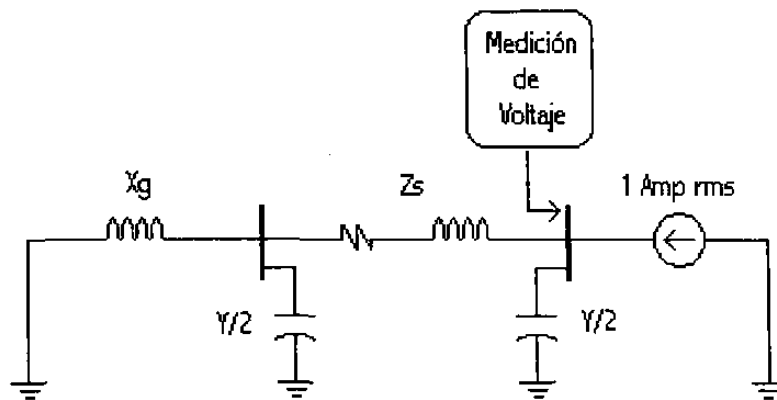


Fig. 6.5 Modelo para análisis de frecuencia.

La Figura 6.5 muestra parte de un sistema, como el estudiado en capítulos anteriores, Figura 2.11. La fuente de voltaje en el extremo de envío, se cortocircuita para obtener el equivalente de Thévenin, visto desde el nodo de carga.

Para el valor de la impedancia, vista desde el nodo de carga y en función de la frecuencia se inyecta una corriente de magnitud de 1.0 Amp rms [14], en el nodo donde se desea el valor de la impedancia equivalente. Se calcula el voltaje y mediante la Ley de Ohm, dada por (6.1) se obtiene la impedancia buscada.

$$Z(\omega) = \frac{V}{I} = \frac{V}{1} = V \quad (6.1)$$

La inyección de corriente es de 1 ampere, con lo cual se obtiene directamente el valor de impedancia, esto a partir de la “medición del voltaje” en el nodo de recepción.

Este proceso se lleva a cabo para cada valor de frecuencia en el rango de interés que se desea analizar; lo cual significa que se varía la frecuencia de la fuente de corriente en cada punto del estudio deseado.

6.4 Fenómeno de Resonancias en Líneas de Transmisión

En este trabajo de investigación y para el análisis de respuesta a la frecuencia de líneas de transmisión, se utilizan los equivalentes modales obtenidos en el Capítulo 2. Al estudio puede incluirse los elementos de compensación reactiva en el dominio modal, como se indico en el Capítulo 3, de manera que se obtiene la respuesta a la frecuencia para cada circuito modal.

Dependiendo del grado de desbalance de la línea de transmisión así será la respuesta que interesa, por ejemplo, para analizar una línea balanceada, la impedancia de secuencia positiva es la que interesa y se usará la transformación de componentes simétricas.

En la Figura 6.6 se presenta la respuesta a la frecuencia, la cual fue obtenida mediante el software de simulación ATPdraw; para el caso de una línea con transposición completa. Las características de la línea de transmisión se presentan en el Apéndice A y las matrices de impedancia y de admitancia equivalentes se muestran en la Tabla 4.4.

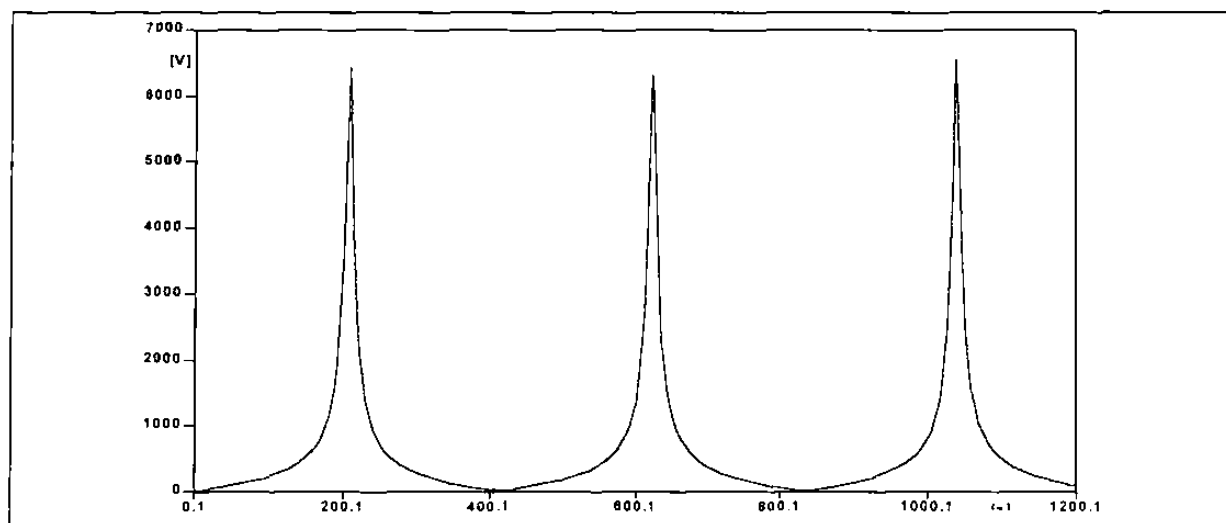


Fig. 6.6 Magnitudes de impedancia en función de la frecuencia, mediante ATPdraw.

Las respuestas a la frecuencia obtenidas de los equivalentes modales se lograron mediante un algoritmo en MATLAB el cual fue desarrollado por el autor. Se muestran resultados en la Figura 6.7, de manera que al considerar una línea balanceada, la respuesta a la frecuencia es la correspondiente a la impedancia de secuencia positiva.

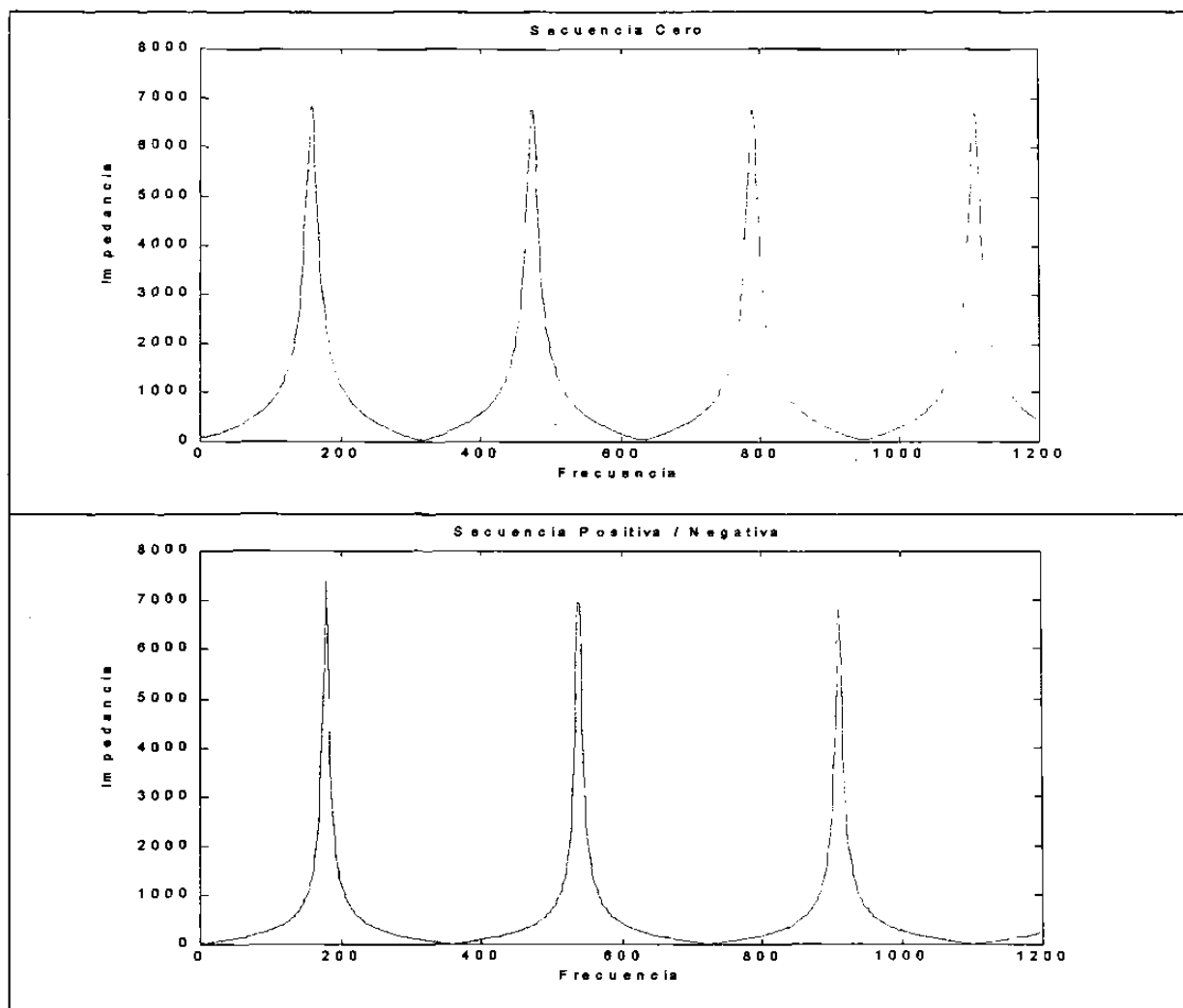


Fig. 6.7 Respuesta a la frecuencia de equivalentes modales.

Si se obtienen las resonancias modales, para una línea de transmisión de características semejantes a la anterior, es decir con las características descritas en la Tabla 4.4 y Apéndice A, pero sin transposición, se puede determinar a partir de ellas las impedancias por fase en función de la frecuencia. En la Figura 6.8 se muestran los resultados obtenidos para las impedancias, en función de la frecuencia, tanto en magnitud como en ángulo para cada equivalente modal, de la línea de transmisión.

Las gráficas de la Figura 6.8 resultan semejantes a las obtenidas para la línea con transposición, sin embargo existe una diferencia en magnitud y en un corrimiento en frecuencia. Mediante una combinación lineal de las respuestas de los tres equivalente modales, se puede obtener las impedancias en función de la frecuencia para cada fase. Para lograr lo anterior se usan las matrices de transformación mostradas en capítulos anteriores, y presentadas en la Tabla A.1. Las matrices de transformación diagonalizan a la matriz de impedancia serie y a la matriz de admitancias, mostradas en la Tabla 4.4 y que corresponden a la línea de transmisión del Apéndice A.

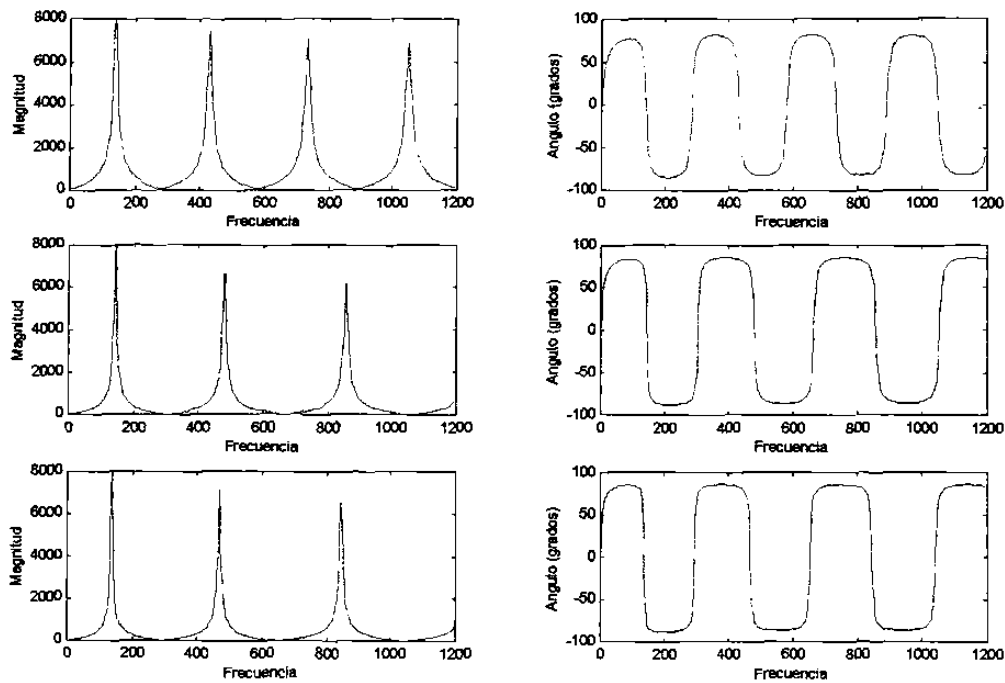


Fig. 6.8 Magnitud y ángulo de las impedancias modales en función de la frecuencia
(Modo Homopolar, Modo Fase-Fase y Modo Interfase respectivamente).

En la Figura 6.9, se observa las resonancias en el dominio de las fases para la línea de transmisión antes descrita.

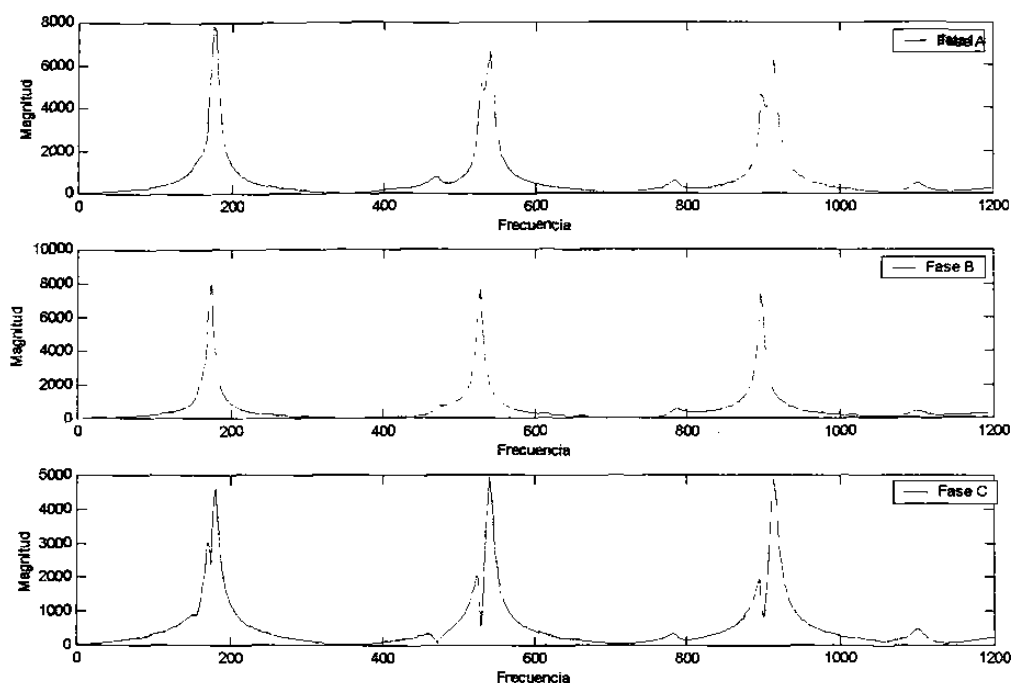


Fig. 6.9 Impedancias de fase en función de la frecuencia.

Con la herramienta desarrollada mediante el procedimiento explicado en esta sección se puede encontrar el comportamiento de una línea de transmisión ante inyecciones de corriente; incluyendo condiciones de carga desbalanceadas.

El resultado se obtiene por la combinación lineal de los modos de propagación, y se observa que los picos o valles de resonancia pueden moverse en la banda de frecuencia analizada.

Si se conoce las condiciones de desbalance de la carga y más aún si se conoce el tipo de carga, se puede determinar las posibles inyecciones armónicas a la red y así evitar que los elementos del sistema operen bajo condiciones de resonancia en serie o en paralelo.

6.5 Efectos debidos a Elementos de Compensación

Al incluir elementos de compensación en las redes de transmisión, debe tenerse en cuenta los resultados de estudios como los presentados en la sección anterior, además de efectuar estudios del contenido armónico en la carga. Debe ser una preocupación el determinar si existen corrientes armónica que coincidan con alguna frecuencia de resonancia para la línea de transmisión. La condición de resonancia puede dañar permanentemente el equipo de compensación, lo cual puede ser por sobrecorriente en caso de presentarse una resonancia paralelo o por sobrevoltaje en el caso de una resonancia serie.

En la Figura 6.10 se presentan los resultados obtenidos para la fase α de las simulaciones efectuadas incluyendo un reactor y un capacitor en derivación sobre la línea de transmisión desbalanceada. Se puede observar que el impacto en el corrimiento de la característica de la impedancias sobre la banda de frecuencias es despreciable para valores de los elementos de compensación de 90 MVAR's, que fueron los valores utilizados en el Capítulo 3 al efectuar estudios de compensación en líneas de transmisión.

Para obtener efectos apreciables en las curvas de la Figura 6.10, se requiere instalar elementos de compensación de valores muy grandes de potencia.

En la Figura 6.10 el efecto de la compensación para la potencia reactiva mediante el capacitor en derivación es prácticamente despreciable, ya que difícilmente se encuentra alguna diferencia en la respuesta a la frecuencia de la línea de transmisión con el caso de la línea de transmisión sin compensar.

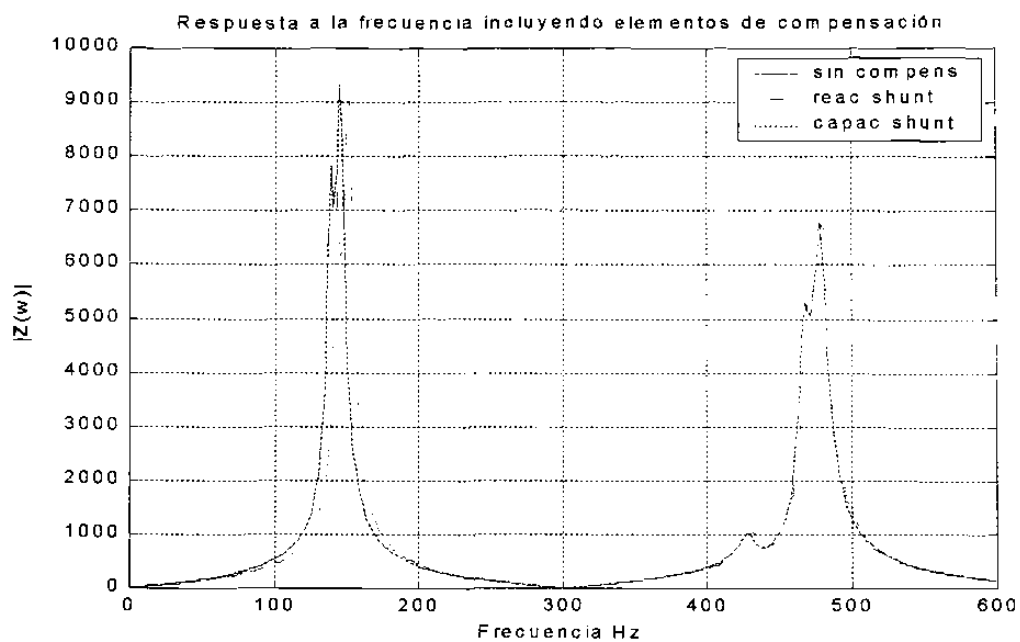


Fig. 6.10 Efecto de compensación en derivación.

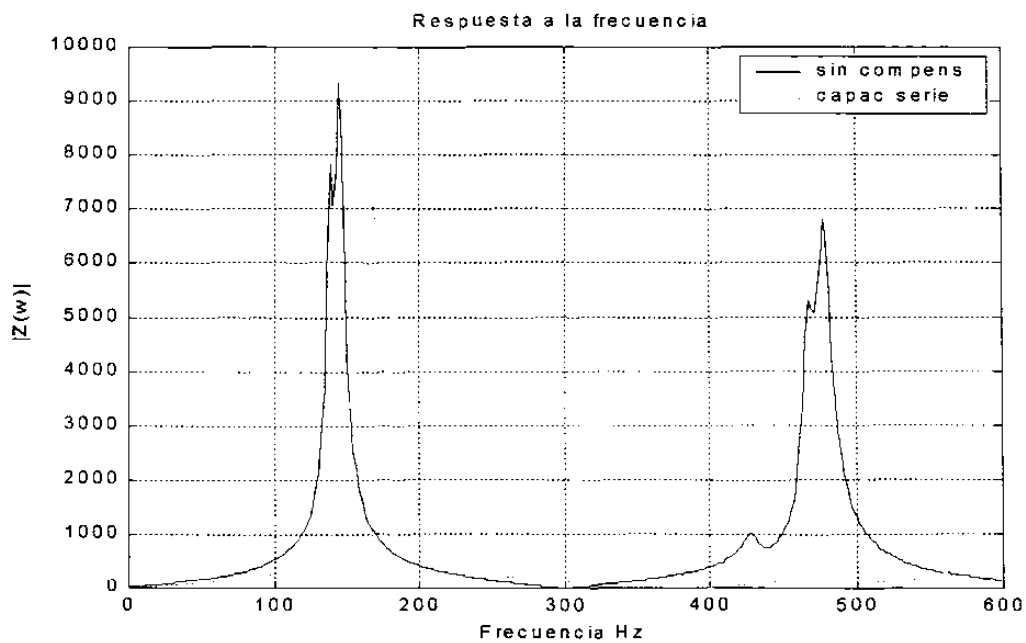


Fig. 6.11 Efecto de la compensación serie en la respuesta a la frecuencia.

La Figura 6.11 se muestra los resultados obtenidos al comparar una línea de transmisión con una compensación serie del 40 % y el caso de la línea sin compensación. En la Figura 6.11 se observa cómo al incluir compensación serie en la línea de transmisión la magnitud de la impedancia tiene un corrimiento en la banda hacia las altas frecuencias, con respecto al caso en que la línea de transmisión no tiene compensación.

Un parámetro importante en este tipo de análisis de la resonancia es que la frecuencia de resonancia se ve afectada por la robustez del sistema. Un sistema de potencia débil provoca que las frecuencias de resonancia de la línea de transmisión tengan un corrimiento hacia las bajas frecuencias, con respecto a una línea de transmisión de las mismas características pero interconectando a sistemas robustos. De esta manera se debe tener un mayor cuidado en determinar las armónicas de bajo orden, las cuales tienen magnitudes mayores con respecto a las armónicas de orden superior. Si se considera la línea de transmisión de la Figura 3.2, se puede llevar a cabo una comparación del efecto que representa la capacidad de corto circuito en las frecuencias de resonancia de la línea de transmisión. Los resultados se muestran en la Figura 6.12.

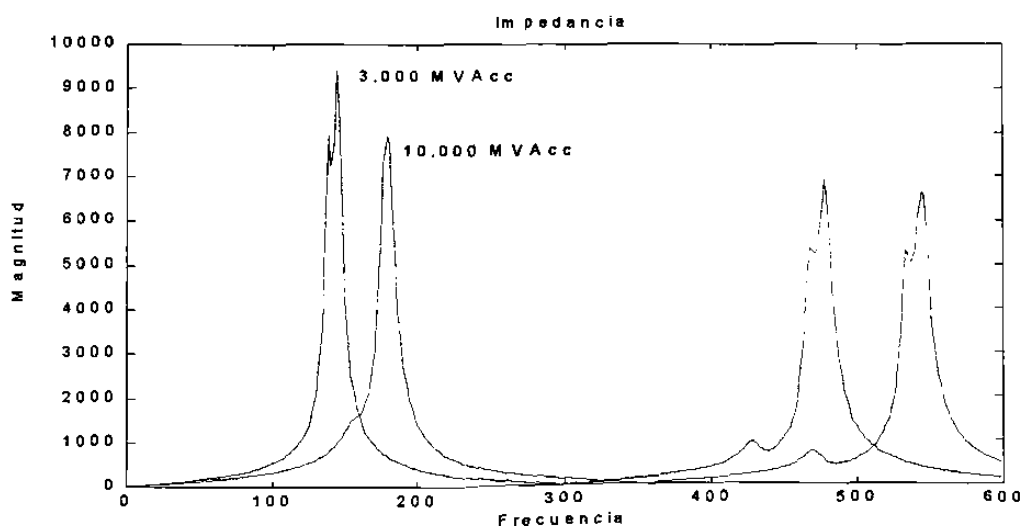


Fig. 6.12 Efecto de la robustez del sistema sobre las frecuencias de resonancia.

6.6 Observaciones

El fenómeno de las resonancias, serie o paralelo, es importante debido a que los sistemas eléctricos no operan en condiciones puramente senoidales. La existencia de corrientes y/o voltajes armónicos puede generar problemas en la operación de los sistemas de transmisión, y en algunos casos, poner en riesgo la seguridad del sistema y los elementos que lo componen.

Los elementos de compensación en derivación para un análisis de sistemas operando en condiciones no senoidales no representan en los sistemas de potencia, un riesgo tan grande como otros factores que deberán considerarse de mayor importancia. Esto es debido a que el corrimiento de la respuesta a la frecuencia en la banda de frecuencias es casi imperceptible.

La compensación serie si tiene un impacto importante en la respuesta a la frecuencia, de manera que al aplicarse a la línea de transmisión, su respuesta a la frecuencia sufre un corrimiento hacia las altas frecuencias.

La capacidad de corto circuito resulta de importancia fundamental en la planeación y en la operación de los sistemas eléctricos, sobre todo en los sistemas altamente contaminados por corrientes armónicas. La operación de los equipos en presencia de resonancias, puede causar un daño permanente en los equipos de compensación o reducir en gran medida la vida útil de los elementos del sistema eléctrico.

Se mostró que el incluir desbalances, en el análisis de los sistemas, puede revelar frecuencias de resonancia que un análisis considerando un sistema balanceado no permite conocer, por lo tanto la metodología presentada presenta un avance para un análisis más completo del fenómeno de resonancias en sistemas desbalanceados.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Introducción

En este capítulo se presentan conclusiones obtenidas por el autor durante la realización del proyecto de investigación. Se presentan además las recomendaciones para trabajos futuros, con la finalidad de ampliar el conocimiento sobre la explotación de los sistemas eléctricos operando en condiciones desbalanceadas que es el caso que realmente ocurre, y así obtener herramientas computacionales que permitan determinar de manera más precisa los márgenes de operación de los sistemas eléctricos de potencia.

7.2 Conclusiones y Aportaciones

Es importante en la planeación de nuevos enlaces de transmisión, prestar atención a las estructuras de las torres de transmisión, debido a la gran dependencia de las distancias entre conductores en la determinación de los parámetros. En la corrección de Carson, mediante la solución de series, en algunos ejemplos se observó la eficiencia de utilizar una corrección de orden 5, la cual es suficiente para tomar en cuenta los efectos principales del retorno por tierra para un gran número de arreglos y configuraciones que se presentan en la práctica.

Durante los estudios realizados se observó el efecto benéfico que se tiene al incluir haces de conductores en la línea de transmisión, por ejemplo de la expresión (2.15), donde se reduce la inductancia equivalente, como se explicó.

Se hizo evidente a lo largo del trabajo, la importancia de herramientas matemáticas como las transformaciones modales, que aplicadas a los sistemas eléctricos sirven para representar los efectos de los desbalances en las redes eléctricas y permiten resolver una gran cantidad de estudios para el análisis, incluyendo los desbalances existentes en los elementos.

En este trabajo las cargas no se consideraron como elementos desbalanceados, debido a que durante la planeación de una línea de transmisión la distribución de la carga se toma como balanceada. Sin embargo, es importante determinar las condiciones de operación del sistema eléctrico, es decir, se debe contar con un buen estimado de la curva de demanda del sistema, ya que de la demanda dependerá los niveles y tipos de compensación que se requiera sobre una línea de transmisión específica.

Se utilizó una transformación modal para analizar el caso de compensación en una línea de transmisión desbalanceada y se planteó una solución de flujos por medio de Newton Rapshon, haciendo uso de los conceptos presentados en el Capítulo 2. Se observaron los efectos de la compensación en derivación y serie sobre los voltajes de cada una de las fases, observándose lo crítico que puede resultar el tomar decisiones operativas y de control sobre un sistema que se supone opera de manera balanceada.

Es importante observar el punto de operación donde la potencia de envío es igual a 1.0 p.u. del SIL de la línea de transmisión, que es el punto donde la línea, vista desde sus terminales mantiene un balance respecto al sistema en potencia reactiva. No se debe olvidar que dadas las consideraciones realizadas en esta formulación las curvas son una aproximación a la capacidad de transferencia de las líneas de transmisión.

En los modelos de líneas de transmisión de parámetros distribuidos, para líneas largas, es importante determinar e incluir las condiciones de resistividad del terreno.

En condiciones desbalanceadas el retorno por tierra es un factor importante para determinar la capacidad de transmisión, razón por la cual se debe incluir las correcciones de Carson, por lo menos hasta la tercer corrección.

En el análisis de cargabilidad para líneas de transmisión desbalanceadas se puede observar que la limitante resulta más estricta en la operación de la línea, que en condiciones balanceadas, lo cual es razonable. De los estudios realizados por el autor se encontró que puede ser más estricto el límite si se considera un punto de operación con magnitud de voltaje, en el nodo de envío de las fases no controladas, ya que se rebasa un cierto margen previamente establecido. Tales resultados se muestran en la Tabla 4.2, en donde se observa que la magnitud del voltaje de una de las fases está abajo de la magnitud nominal de operación.

Se puede concluir que resulta importante el determinar los nodos más convenientes para un enlace de transmisión. De la capacidad de corto circuito disponible en esas barras dependerá en gran medida la máxima transferencia de potencia por los enlaces planeados.

Las estadísticas de energización desarrolladas en el Capítulo 5 muestran una forma de utilizar estas herramientas computacionales para determinar, por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de una sobrecorriente en interruptores y para calcular la reducción de la vida útil de este y otros elementos en el sistema.

En el Capítulo 6 se presentaron estudios de resonancia para configuraciones de la línea de transmisión y elementos de compensación. La importancia del capítulo se expresa en el desarrollo de una metodología que permite analizar resonancia para líneas desbalanceadas. Como experiencia adicional se tiene que el tiempo de ejecución del algoritmo en MATLAB[®] es menor que el cálculo de las resonancias por fases de la línea de transmisión, en comparación con ATPdraw. Además en el ATPdraw no pueden observarse las resonancias modales por separado, respecto de las resonancias vistas en las fases.

Se observa que al incluir elementos de compensación en derivación con valores que se asocian con la compensación de potencia reactiva, en un ambiente de estado estable y operando a frecuencia fundamental, las frecuencias de resonancia no difieren significativamente de las frecuencias de resonancia ya obtenidas para el caso donde la línea no contiene compensación.

En cambio la compensación serie sí tiene un efecto significativo en la localización de las resonancias del sistema de transmisión y al compensar la línea de transmisión las frecuencias de resonancia tienen un corrimiento en la banda de frecuencia, hacia las frecuencias altas. Como en los espectros de corrientes armónicas obtenidos comúnmente, las cargas presentan corrientes armónicas que tienen una mayor amplitud para las corrientes armónicas de frecuencias más cercanas a la frecuencia fundamental, esto provoca que las magnitudes de los posibles sobrevoltajes debidos a resonancias en paralelo o de sobrecorriente en el caso de resonancias en serie serán mayores.

Un parámetro que influye en mayor medida los valores de las frecuencias de resonancia es la capacidad de corto circuito del sistema; al cual se conectará la línea de transmisión. Así, para sistemas débiles, las frecuencias de resonancia se corren hacia las bajas frecuencias, y como se menciona en el párrafo anterior las corrientes armónicas o voltajes armónicos de bajo orden son las que tendrán una mayor amplitud. De aquí la importancia de establecer estudios cuidadosos para los sistemas débiles.

7.3 Recomendaciones para trabajos futuros

En esta sección se mencionan algunas recomendaciones del autor para trabajos futuros en la investigación del efecto de los desbalances en la planeación, la operación y el control de líneas de transmisión:

Se puede desarrollar un modelo con parámetros dependientes de la frecuencia, de manera que las matrices de transformación resultantes sean también dependientes de la frecuencia, para el análisis de fenómenos transitorios en la red. El desarrollar un modelo eficiente para el análisis de redes eléctricas más complejas que las planteadas en este trabajo de investigación, por ejemplo con configuraciones de mallas. Aplicar otras herramientas computacionales, ya que se observó que los programas desarrollados por el autor en MATLAB®, para los estudios de cargabilidad de la línea de transmisión, son lentos y ocupan una gran capacidad de memoria. Plantear algoritmos más eficientes puede ser benéfico para reducir los tiempos de ejecución.

Las formulaciones escritas en componentes de fase *abc*, para la solución de flujos de potencia y aplicarse a estudios de cargabilidad y perfiles de voltaje puede también ser un avance importante acelerando la convergencia, en comparación con el algoritmo presentado en el Capítulo 4 con base en el análisis nodal, ya que se tiene una convergencia lenta.

Aprovechar las herramientas desarrolladas en esta tesis, para plantear posibles estudios de estabilidad u otros que se requieran analizar el efecto de los desbalances, como estudios de energización, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Florencio Aboytes G., *Análisis de Sistemas de Potencia*, Centro Nacional de Control de la Energía, Comisión Federal de Electricidad de México, Monterrey, N. L., Mayo 1990.
- [2] Florencio Aboytes, *Control de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia*, Centro Nacional de Control de la Energía, Comisión Federal de Electricidad de México, Monterrey, N. L., Mayo 1991.
- [3] Stevenson & Grainger, *Análisis de Sistemas de Potencia*, McGraw-Hill 1996.
- [4] J. José Guerrero G., Florencio Aboytes G., "Modelación de Líneas de Transmisión", Proyectos de Investigación DIE-87-05, UANL, Agosto 1987.
- [5] Rakosh Das Begamudre, *Extra High Voltage AC Transmission Engineering*, John Wiley & Sons, 1986.
- [6] Turan Gönen, *Electric Power Distribution System Engineering* 1986. McGraw-Hill,
- [7] J. José Guerrero G., Florencio Aboytes G., "Análisis de Desbalances en Líneas de Transmisión", Proyecto de Investigación DIE-88-08, UANL, Octubre 1989.
- [8] J. Arrillaga & C. P. Arnold, *Computer Analysis of Power Systems*, John Wiley & Sons, 1990.
- [9] John Sall, Ann Lehman, *JMP Start Statistics*, SAS Institute Inc, Duxbury Press, 1996.
- [10] Dennis G. Zill, *Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones, Segunda Edición*, Grupo Editorial Iberoamérica, 1988.
- [11] Allan Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems, Second Edition*, John Wiley & Sons.
- [12] Fishbane, Gasiorowicz, Thornton, *Física Para Ciencias e Ingeniería*, Prentice Hall, Vol. II, 1993.
- [13] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P.S. Bodger, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, 1985.

- [14] Hermann W. Dommel, *Electromagnetic Reference Program Reference Manual, (Theory Book)*, Bonneville Power Administration, 1986.
- [15] Walpole, Myers, *Probabilidad y Estadística*, Cuarta Edición, McGraw-Hill, 1992.
- [16] Donald V. Richardson, Arthur J. Caisse, Jr, *Máquinas Eléctricas Rotativas y Transformadores*, Cuarta Edición, Prentice may, 1997.
- [17] William H. Hayt, Jr, *Teoría Electromagnética*, Quinta Edición, Mc. Graw Hill, 2000
- [18] *EHV Reference Book, General Electric*
- [19] J. Alberto Avalos G., Salvador Acha Daza, “Aspectos Básicos y Metodología para el Análisis de Cargabilidad”, SIEEEM 93, Monterrey, N. L., Octubre 1993.
- [20] Simpson Linke, “Surge Impedance Loading and Power Transmission Capability Revisited”, Publicación Desconocida IEEE, 1974
- [21] C. L. Fortescue, “Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”, *Trans. AIEE, Vol 37, 1918*.
- [22] H. W. Dommel, “Transmission Line Models for Harmonics Studies”, International Conference on Harmonics in Power Systems, Worcester Polytechnic Institute, October 1984.
- [23] Alberto Martínez Mares, Salvador Acha Daza, “Análisis de Cargabilidad en Líneas de Transmisión Desbalanceadas”, Reunión de Verano de Potencia 2001, Acapulco Guerrero, Julio 2001.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Vectores derechos	36
Tabla 2.2	Corrientes de fase y componentes modales	43
Tabla 2.3	Solución de flujos de potencia desbalanceados	44
Tabla 3.1	Contribución de los modos de propagación a los voltajes de las fases	66
Tabla 4.1	Propiedades de las funciones hiperbólicas	77
Tabla 4.2	Comparación de límites de una línea balanceada y una línea desbalanceada	86
Tabla 4.3	Comparación de voltajes del caso balanceado y caso desbalanceado	86
Tabla 4.4	Matrices de Impedancias y Admitancias de la línea de transmisión del Apéndice A	97
Tabla 4.5	Efecto del control del flujo de potencia en las magnitudes de voltaje	99
Tabla A.1	Parámetros del conductor utilizado e los estudios de esta tesis	139
Tabla A.2	Matrices de impedancia y admitancia de la línea de transmisión	140
Tabla A.3	Matrices de transformación T_v y T_i de las expresiones (2.70) y (2.71)	140

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS

Fig. 2.1	Disposición Geométrica de conductores en un haz	4
Fig. 2.2	Conductor trenzado 26 Al/7 Fe, en dos capas cada uno	6
Fig. 2.3	Sección transversal de un conductor de radio r	8
Fig. 2.4	Distancias en líneas multi-conductores, con su respectivas imágenes	11
Fig. 2.5	Cálculo de distancias entre conductores y sus imágenes	18
Fig. 2.6	Línea de transmisión con parámetros distribuidos	27
Fig. 2.7	Sección elemental de la línea de transmisión	27
Fig. 2.8	Equivalente π de la línea de transmisión modelada con parámetros distribuidos	32
Fig. 2.9	Red de dos puertos	33
Fig. 2.10	Representación de vectores derechos	36
Fig. 2.11	Circuitos modales π equivalentes, con parámetros distribuidos	40
Fig. 2.12	Sistema radial	40
Fig. 2.13	Equivalente modal para el estudio de flujos de carga	44
Fig. 3.1	Equivalente modal de la línea incluyendo un elemento compensador	50
Fig. 3.2	Circuito radial equivalente	55
Fig. 3.3	Circuito equivalente con compensación serie	56
Fig. 3.4	Circuito equivalente, caso de línea sin pérdidas	57
Fig. 3.5	Características de transferencia de potencia	60
Fig. 3.6	Perfil de voltaje, caso base	62
Fig. 3.7	Perfiles de voltaje ante diferentes tipos de compensación, caso balanceado	63

Fig. 3.8	Perfiles de voltaje con diferentes tipos de compensación, caso desbalanceado	64
Fig. 3.9	Diagramas fasoriales de las contribuciones modales a los voltajes de las fases	67
Fig. 4.1	Modelo de línea para análisis de cargabilidad	72
Fig. 4.2a	Curvas de transferencia de potencia normalizadas al SIL, línea balanceada sin pérdidas	79
Fig. 4.2b	Curvas de transferencia de potencia normalizadas al SIL, línea desbalanceada sin pérdidas	79
Fig. 4.3	Segmentos de transposición de una línea de transmisión	81
Fig. 4.4	Curvas de cargabilidad de una línea de transmisión balanceada	82
Fig. 4.5	Curvas de cargabilidad de una línea de transmisión sin pérdidas	83
Fig. 4.6	Curvas de cargabilidad de una línea de transmisión desbalanceada	85
Fig. 4.7	Intercambio de energía mediante enlaces múltiples	87
Fig. 4.8	Equivalente de un sistema de múltiples enlaces	88
Fig. 4.9	Sistema equivalente de enlaces múltiples	90
Fig. 4.10	Conexión Y-Y, transformador equivalente para representar el sistema	91
Fig. 4.11	Modelo trifásico de la línea de transmisión	94
Fig. 4.12	Análisis de Cargabilidad de Sistemas de Múltiples Enlaces	97
Fig. 5.1	Sistema de prueba para el interruptor estadístico	103
Fig. 5.2	Sobrecorriente característica de una energización	103
Fig. 5.3	Señal de voltaje entre polos del interruptor antes del cierre	106
Fig. 5.4	Resultados del interruptor estadístico de la simulación Montecarlo de cierres aleatorios	106
Fig. 5.5	Cálculo de correlación entre tiempo de cierre y corriente máxima	108
Fig. 5.6	Función de densidad de probabilidad	109
Fig. 5.7	Gráfica de contornos de densidad de probabilidad	110

Fig. 6.1	Sistema eléctrico expuesto a una resonancia serie	113
Fig. 6.2	Igualdad de impedancias	114
Fig. 6.3	Sistema expuesto a una resonancia paralelo	115
Fig. 6.4	Magnitud de la impedancia vista desde el nodo de recepción	116
Fig. 6.5	Modelo para análisis de frecuencia	116
Fig. 6.6	Magnitudes de impedancia en función de la frecuencia, mediante ATPdraw	118
Fig. 6.7	Respuesta a la frecuencia de equivalentes modales	119
Fig. 6.8	Magnitud y ángulo de las impedancias modales en función de la frecuencia	120
Fig. 6.9	Impedancias de fase en función de la frecuencia	121
Fig. 6.10	Efecto de compensación en derivación	123
Fig. 6.11	Efecto de la compensación serie en la respuesta a la frecuencia	123
Fig. 6.12	Efecto de la robustez del sistema sobre las frecuencias de resonancia	124
Fig A.1	Torre de transmisión, estructura tipo A	139

APENDICE A

Línea de Transmisión Pitirera – Donato Guerra

APENDICE A

Línea de Transmisión Pitirera – Donato Guerra

En este apéndice se presentan datos de la línea de transmisión utilizada en los estudios desarrollados en esta tesis.

En esta tesis se presentan herramientas que permitan llevar a cabo estudios y análisis sobre líneas de transmisión de alto voltaje. Los estudios llevados a cabo durante la realización de esta tesis se basaron en parámetros de líneas de transmisión con las características de la línea que interconecta las subestaciones de Pitirera y Donato Guerra, localizadas en el estado de Michoacán y el Estado de México; ambas subestaciones pertenecientes al sistema eléctrico nacional.

Características:

- Línea de transmisión de 400 kV
- La línea de transmisión consta de dos hilos de guarda, 3/8" de acero
- Tres conductores por fase, tipo Bluejay
- Estructura de torre tipo A
- Longitud aproximada de 370 Km, con una subestación intermedia
- Es una línea de transmisión desbalanceada

Conductores de fase:

Tabla A.1 Parámetros del conductor utilizado en los estudios de esta tesis.

Clave	Área de Al, cmil	Trenzado	Capas de Al	Diámetro
Bluejay	1,113,000	45/7	3	1.259"

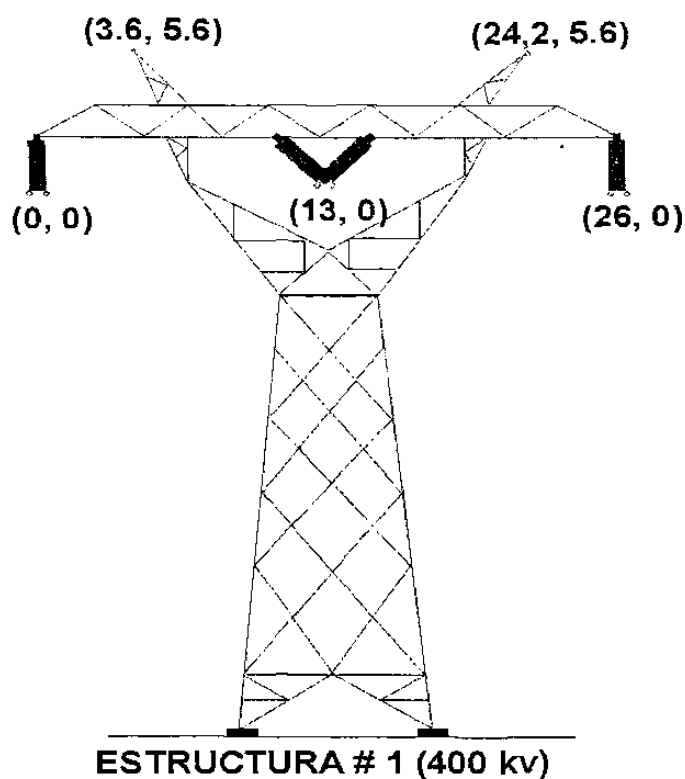


Fig. A.1 Torre de transmisión, estructura tipo A.

La línea de transmisión es modelada mediante matrices de impedancias y admitancias en la Tabla A.1, presentada a continuación. Las matrices fueron calculadas mediante los programas de MATLAB® desarrollados por el autor.

La altura de los conductores de fase de los extremos es de 25.3 metros, el conductor de fase central tiene una altura de 24.9 metros y los hilos de guarda una altura de 7.82 metros.

Los datos de las matrices reducidas son presentados en p.u./km, para una base de potencia de 300 MVA trifásicos y un voltaje base de 400 kV, el cual es el voltaje nominal de operación de la línea de transmisión.

Tabla A.2 Matrices de impedancia y admitancia de la línea de transmisión.

Zabc con hilos de guarda			Ω/km	
0.0002 + 0.0236i	0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0229i	0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0229i
0.0001 + 0.0230i	0.0002 + 0.0236i	0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0230i
0.0001 + 0.0229i	0.0001 + 0.0230i	0.0002 + 0.0236i	0.0001 + 0.0229i	0.0001 + 0.0230i
0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0229i	0.0077 + 0.0236i	0.0001 + 0.0229i
0.0001 + 0.0229i	0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0230i	0.0001 + 0.0229i	0.0077 + 0.0236i
Yabc con hilos de guarda			mhos/km	
0 + 0.0024i	0 - 0.0005i	0 - 0.0002i	0 - 0.0006i	0 - 0.0002i
0 - 0.0005i	0 + 0.0024i	0 - 0.0005i	0 - 0.0003i	0 - 0.0003i
0 - 0.0002i	0 - 0.0005i	0 + 0.0024i	0 - 0.0002i	0 - 0.0006i
0 - 0.0006i	0 - 0.0003i	0 - 0.0002i	0 + 0.0022i	0 - 0.0002i
0 - 0.0002i	0 - 0.0003i	0 - 0.0006i	0 - 0.0002i	0 + 0.0022i
Zabc sin hilos de guarda			$\times 10^{-3}$	
0.202+0.874i	0.108+0.333i		0.108+0.244i	
0.108+0.333i	0.202+0.888i		0.108+0.333i	
0.108+0.244i	0.108+0.333i		0.202+0.874i	
Yabc sin hilos de guarda				
0.0024i	-0.0005i		-0.0002i	
-0.0005i	0.0024i		-0.0005i	
-0.0002i	-0.0005i		0.0024i	

Tabla A.3 Matrices de transformación T_v y T_i de las expresiones (2.70) y (2.71).

<i>T_v</i>		
0.5777 - 0.0297i	-0.7069 + 0.0171i	0.3503 + 0.0405i
0.5750 - 0.0103i	0.0000 - 0.0000i	-0.8659 - 0.0399i
0.5777 - 0.0297i	0.7069 - 0.0171i	0.3503 + 0.0405i
<i>T_i</i>		
0.6121 - 0.0323i	-0.7056 + 0.0465i	0.4036 + 0.0496i
0.4986 + 0.0082i	0.0000 + 0.0000i	-0.8149 - 0.0726i
0.6121 - 0.0323i	0.7056 - 0.0465i	0.4036 + 0.0496i

